

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Energetica



**GESTIONE E REGOLAZIONE DI UN GENERATORE AD ACQUA
SURRISCALDATA**

Relatore: Prof. Matteo ROMANO

Tesi di Laurea di:

Diego ROCCA Matr. 735694

Anno Accademico 2010 - 2011

Indice generale

SOMMARIO	7
INTRODUZIONE.....	9
CAPITOLO 1	11
CALDAIE A TUBI D’ACQUA BONO ENERGIA	11
<i>1.1. Descrizione</i>	<i>11</i>
<i>1.2. Componenti.....</i>	<i>12</i>
1.2.1. Collettore e fascio tubiero.....	12
1.2.2. Preriscaldatore aria	13
1.2.3. Bruciatore.....	14
1.2.4. Ventilatori	17
1.2.5. Quadro MCC e di controllo	19
<i>1.3. Processo di combustione</i>	<i>21</i>
1.3.1. Formazione di inquinanti nel processo di combustione.....	21
1.3.2. Processo di combustione nei bruciatori Bono Energia	23
CAPITOLO 2	27
SISTEMI DI REGOLAZIONE DEL GENERATORE	27
2.1. <i>Descrizione generale</i>	<i>27</i>
2.2. <i>Schema di processo.....</i>	<i>28</i>
2.2.1. Alimentazione combustibile	28
2.2.2. Aria comburente	30
2.2.3. Generatore e linea acqua surriscaldata.....	32
2.3. <i>Burner Management System (BMS).....</i>	<i>36</i>
2.3.1. Sequenza di lavaggio	36

2.3.2.	Sequenza test di tenuta valvole combustibile	42
2.3.3.	Sequenza di accensione	42
2.3.4.	Sequenza di post-lavaggio	46
2.4.	<i>Sistema di regolazione della combustione (SRC)</i>	47
2.4.1.	Controllo di combustione – Master di temperatura	48
2.4.2.	Portata metano	50
2.4.3.	Portata aria comburente	53
2.4.4.	Ricircolo fumi	61
2.4.5.	Controllo portata acqua surriscaldata	63
CAPITOLO 3		65
ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEL GENERATORE		65
3.1.	<i>Elementi di regolazione di sistemi dinamici</i>	65
3.2.	<i>Dati di funzionamento del generatore</i>	68
3.3.	<i>Diminuzione di carico: 100% → 75%</i>	69
3.4.	<i>Aumento di carico: 75% → 100%</i>	73
CONCLUSIONI		77
APPENDICE 1		79
UNI/TS 11325-3:SORVEGLIANZA DEI GENERATORI DI VAPORE E/O ACQUA SURRISCALDATA		79
ELENCO DEGLI ACRONIMI		83

Indice delle figure

Fig. I.1 Assetto di un impianto di teleriscaldamento	10
Fig. 1.1. Collettore e fascio tubiero	13
Fig. 1.2. Preriscaldatore dell'aria comburente	14
Fig. 1.3. Bruciatore low-NO _x	16
Fig. 1.4. Dispositivo di misurazione della portata ad <i>air foil</i>	19
Fig. 1.5. Espansione del getto generata dal movimento rotario (<i>swirl</i>)	24
Fig. 1.6. Generazione del ricircolo interno per flussi ad elevata vorticosità	25
Fig. 2.1. Linea di alimentazione del combustibile.....	29
Fig. 2.2. Alimentazione aria comburente e ricircolo fumi.....	31
Fig. 2.3 Schema di processo generatore e linea acqua surriscaldata	35
Fig. 2.4.a. Flow chart fase lavaggio	39
Fig. 2.4.b. Flow chart fase lavaggio.....	40
Fig. 2.4.c Flow chart fase lavaggio	41
Fig. 2.5.a Flow chart sequenza accensione	44
Fig. 2.5.b Flow chart sequenza accensione.....	45
Fig.2.7. Controllo di combustione – Portata metano	52
Fig.2.8. Curva eccesso d'aria-potenza misurata	54
Fig.2.9. Curva percentuale di ossigeno nei fumi-potenza misurata.....	55
Fig. 2.10. Controllo percentuale di ossigeno nei fumi.....	58
Fig. 2.11.a. Controllo portata aria.....	59
Fig. 2.11.b. Controllo portata aria.....	60
Fig. 2.12. Controllo portata ricircolo fumi.....	62
Fig. 2.13. Controllo portata acqua surriscaldata	64
Fig. 3.1. Schema di un sistema di regolazione ad anello aperto	66
Fig. 3.2. Schema di un sistema di regolazione ad anello chiuso.....	66
Fig. 3.3. Effetto del fattore di correzione SC_{OXY}	71
Fig. 3.4. Curve di regolazione della portata d'aria	73

Sommario

Nell'ambito dell'opera di ampliamento del sistema di teleriscaldamento nella città di Parma, l'azienda Bono Energia SpA è stata incaricata della fornitura di tre generatori di acqua surriscaldata per servizio di backup.

Il progetto di realizzazione del Polo Ambientale Integrato (PAI) da parte della società Iren Emilia S.p.A. prevede la costruzione ex novo di un impianto di termovalorizzazione, il quale verrà allacciato alla rete esistente. La centrale funzionerà in assetto cogenerativo e fornirà energia elettrica a 40300 utenze ed energia termica ad ulteriori 24800 utenze.

I generatori di acqua surriscaldata di produzione Bono Energia verranno integrati all'impianto come sorgente termica ausiliaria durante le ore di massima richiesta termica.

Scopo del lavoro è una descrizione delle caldaie realizzate da Bono Energia, con un'analisi del funzionamento previsto in condizioni di esercizio, ai carichi parziali e delle logiche di regolazione.

Introduzione

Il teleriscaldamento consiste nella distribuzione, attraverso una serie di tubazioni e condotti interrati, di acqua calda, acqua surriscaldata o vapore proveniente da una grossa centrale di produzione, alle utenze finali con successivo ritorno del fluido termovettore alla centrale stessa. A destinazione il fluido termovettore riscalda, attraverso uno scambiatore di calore acqua-acqua o vapore-acqua (generalmente a piastre), l'acqua dell'impianto di riscaldamento dell'abitazione, sostituendo in pratica le caldaie delle utenze.

La sorgente termica può essere ricavata da un combustibile fossile, per esempio il metano, oppure da una materia prima a “costo zero”, come la termovalorizzazione dei rifiuti. Altre volte il calore viene generato con materiale ligneo derivante da scarti, con effetto benefico perché viene recuperato materiale altrimenti destinato alla distruzione.

L'acqua per teleriscaldamento viene generalmente prodotta tramite cogenerazione, ossia in centrali elettriche che attuano un recupero di calore dall'acqua calda o dal vapore di processo e/o fumi, prodotti da un motore primo alimentato a combustibile fossile (gas naturale, olio combustibile, biomasse, biogas o altro): si ottiene così un significativo risparmio di energia rispetto alla produzione separata dell'energia elettrica e dell'energia termica.

Il più comune esempio di impianto cogenerativo è quello realizzato con turbogas/motore alternativo e caldaia a recupero. I fumi del turbogas o del motore alternativo vengono convogliati attraverso un condotto fumi nella caldaia a recupero, che può essere di tipo semplice o con post-combustione. I fumi in caldaia permettono di produrre acqua calda, vapore saturo o vapore surriscaldato utilizzati, rispettivamente, per scopi di riscaldamento, per utenze industriali o per turbine a vapore.

Introduzione

In definitiva si ottiene energia elettrica derivante dall'alternatore accoppiato al turbogas o al motore, ed energia termica sotto forma di vapore, utilizzato poi dalle utenze connesse.

Un'altra possibilità è quella di produrre vapore da far evolvere attraverso turbine per generazione di energia elettrica, sfruttando il cascame energetico ed eventuali spillamenti dalla turbina per riscaldare il fluido termovettore, alimentato poi verso la rete di teleriscaldamento. Tale situazione si rende particolarmente conveniente per impianti di termovalorizzazione dei rifiuti o di scarti lignei.

Il limite fondamentale di questa applicazione è dovuto alla distanza dai luoghi scaldati rispetto alla centrale di produzione, in quanto le perdite di calore lungo il tragitto non rendono conveniente il teleriscaldamento sia dal punto di vista tecnologico che termodinamico. In una configurazione tipica le dispersioni ammontano a circa il 13÷16% del calore immesso in rete e, all'aumentare della distanza, si possono rendere necessarie stazioni intermedie che aumentano la pressione e la temperatura dell'acqua.

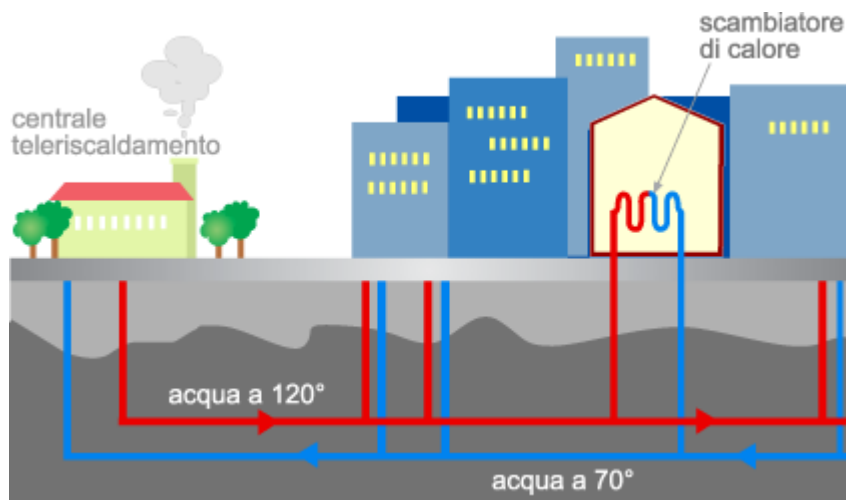


Fig. I.1 Assetto di un impianto di teleriscaldamento

Capitolo 1

Caldaie a tubi d'acqua Bono Energia

1.1. Descrizione

I generatori di acqua surriscaldata Bono Energia oggetto dello studio sono previsti per un funzionamento a gas naturale, e sono idonei per esercizio senza sorveglianza continua (24h). Essi sono destinati a rientrare nel progetto di realizzazione dell'impianto di termovalorizzazione cogenerativo a Parma, che prevede la realizzazione di due nuove linee per il recupero energetico dei rifiuti solidi, complete di depurazione e recupero termico.

Ciascun generatore è costituito da una camera di combustione completamente schermata a tubi tangenti, all'interno dei quali circola l'acqua alimentata da un collettore di distribuzione, e da un fascio tubiero convettivo nel quale si completa il raffreddamento dei prodotti di combustione. Questi sono poi ulteriormente raffreddati da un preriscaldatore dell'aria comburente a tubi verticali, che consentono un incremento del rendimento globale del generatore.

Tubi e collettori sono realizzati in acciaio al carbonio per utilizzo ad alta pressione, mentre il preriscaldatore è dimensionato per un regime termico tale da evitare, a tutti i carichi anche parziali, la formazione di condense acide.

I bruciatori sono di produzione Bono Energia a basso NO_x , con ricircolo esterno parziale dei gas combusti tramite un apposito ventilatore centrifugo di estrazione dal camino e regolazione per mezzo di inverter.

L'aria comburente è fornita per mezzo di un ventilatore centrifugo a bassa rumorosità, con regolazione dell'aria per mezzo di variazione dell'apertura della serranda e variazione del regime di rotazione per mezzo di inverter.

Il controllo del bruciatore e delle variabili di regolazione avviene tramite un sistema di controllo a PLC che consente l'esercizio senza sorveglianza continua (24h), con

gestione automatica degli allarmi e interfaccia al sistema di controllo da remoto di cui sarà dotato l'impianto.

Ogni generatore ha una potenzialità al massimo carico continuo (M.C.R.) pari a 13.3 MW, modulabile dal 20% al 100%, con un volume d'acqua elaborato pari a 470 m³/h. L'acqua surriscaldata viene mandata all'anello di teleriscaldamento ad una temperatura di 120°C e ritorna all'impianto ad una temperatura di 90/95 °C, con una pressione minima di 5 barg e massima di 12 barg.

1.2. Componenti

1.2.1. Collettore e fascio tubiero

L'alimentazione dell'acqua al fascio tubiero avviene attraverso un collettore avente diametro 12" montato verticalmente, con ingresso nella parte bassa e uscita dell'acqua surriscaldata nella parte alta.

La camera di combustione e la zona convettiva di caldaia sono disposte l'una sopra l'altra, in modo che i fumi prodotti dalla combustione, dopo aver percorso la camera superiore, vengano deviati verso il basso per attraversare il fascio convettivo fluendo in senso contrario per raggiungere infine il preriscaldatore dell'aria integrato nella parte anteriore del generatore.

L'acqua entrante nel collettore è canalizzata attraverso un percorso a setti lungo il fascio tubiero, attraversando in sequenza il fascio convettivo prima e la camera di combustione in seguito. L'acqua viene così riscaldata dalla temperatura di ritorno dall'anello di teleriscaldamento alla temperatura di mandata richiesta.

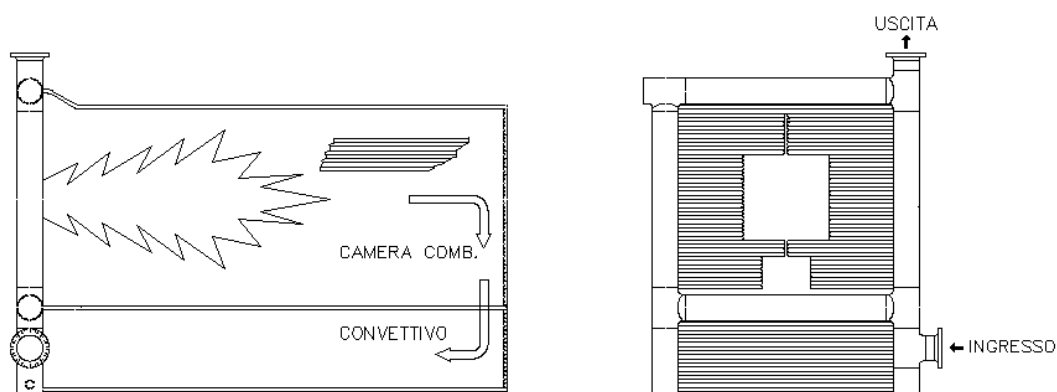


Fig. 1.1. Collettore e fascio tubiero

1.2.2. Preriscaldatore aria

Per consentire il recupero di parte del calore contenuti nei prodotti di combustione, a monte del generatore è installato un preriscaldatore dell'aria comburente.

I fumi provenienti dal banco convettivo inferiore sono convogliati verso il preriscaldatore e forzati ad attraversare una serie di tubi verticali mandrinati ad una piastra tubiera in lamiera di acciaio al carbonio. L'aria comburente viene spinta dal ventilatore in una bocca posta nella parte superiore e, seguendo un percorso a setti formato da piastre tubiere intermedie, lambiscono i tubi riscaldandosi per poi essere convogliati al bruciatore.

I fumi in risalita all'interno dei tubi vengono finalmente raccolti in una camera superiore delimitata da una seconda piastra tubiera di separazione con l'aria comburente e convogliati al camino.

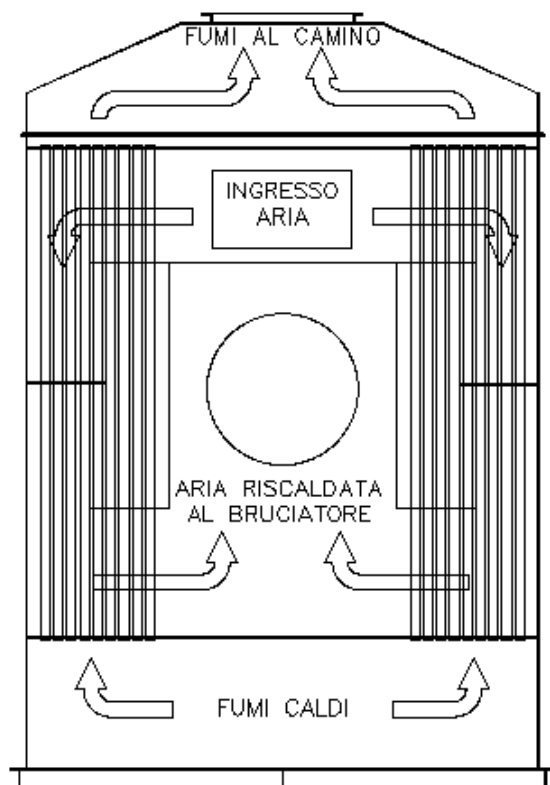


Fig. 1.2. Preriscaldatore dell'aria comburente

1.2.3. Bruciatore

La combustione è realizzata da un bruciatore a gas metano modulante, con capacità di regolazione dal 20% al 100% del carico massimo continuo, a basso NO_x con ricircolo esterno parziale dei prodotti di combustione.

L'aria comburente, fornita dal ventilatore, giunge alla regione di fiamma dopo aver attraversato un registro di vorticosità, il quale ha l'effetto di imprimere all'aria un movimento rotatorio. Il registro è costituito da un meccanismo comandato da un albero il quale, ruotando attorno al proprio asse, consente una maggiore o minore apertura delle pale disposte lungo una circonferenza, che si traduce in una minore o maggiore velocità dell'aria.

Una maggiore velocità dell'aria determina una migliore miscelazione fra l'aria ed il combustibile ed una minore lunghezza di fiamma; tuttavia un'eccessiva chiusura delle pale di registro può comportare un insufficiente afflusso di aria comburente, pertanto si rende necessario modificare l'apertura della serranda di regolazione per garantire una portata sufficiente di aria comburente.

Una volta trovato il giusto compromesso tra capacità di miscelazione e lunghezza della fiamma il registro viene mantenuto in posizione fissa, mentre la regolazione avviene tramite la serranda e variando la velocità del ventilatore per mezzo di inverter.

L'aria comburente, dopo aver attraversato il registro, fluisce attraverso un anello di imbocco verso il diffusore, un apposito elemento di forma conica in materiale resistente al calore, che ha lo scopo di fornire l'aria comburente alla fiamma attraverso una serie di aperture, evitando che la questa venga trascinata dall'aria stessa. Il combustibile viene convogliato radialmente al diffusore attraverso una serie di lance terminanti con ugelli, che formano un getto ad elevata velocità il quale, miscelandosi localmente con l'aria comburente, crea le condizioni di miscela ottimali per poter generare la reazione di combustione..

La fiamma, nella sua parte iniziale, è contenuta da un cono in calcestruzzo refrattario, avente temperatura di impiego superiore ai 1500°C, che ha lo scopo di mantenere l'aria nelle strette vicinanze della fiamma e favorire la combustione per effetto radiante.

L'avviamento del bruciatore è consentito da un pilota di accensione, costituito fondamentalmente da un tubo di alimentazione del gas ed un elettrodo di accensione. Una volta che il dispositivo di comando fornisce il consenso all'avviamento, l'elettrodo scocca una scintilla che comporta l'accensione della fiamma pilota la quale, nella seconda fase, innesca la fiamma principale dando il via alla reazione di combustione.

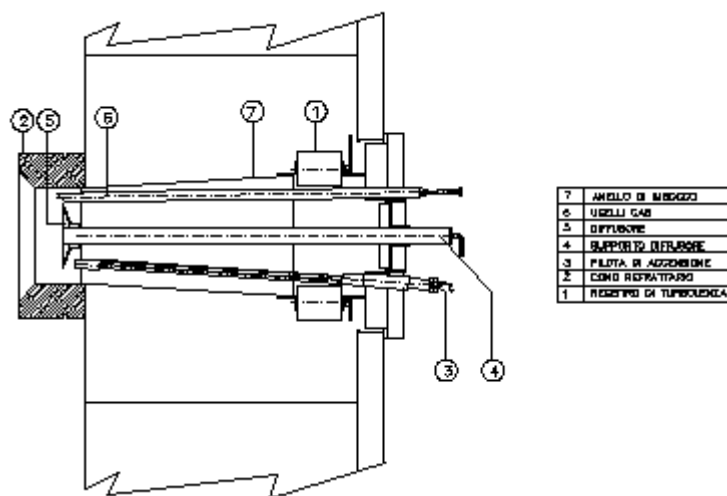


Fig. 1.3. Bruciatore low-NO_x

L'alimentazione del combustibile avviene tramite una rampa gas realizzata in conformità alla norma UNI EN 12952, la quale prevede:

- Valvola manuale di intercettazione, che deve essere posta in posizione sicura e deve interrompere in maniera affidabile l'erogazione di combustibile al locale della caldaia;
- Filtro di rimozione delle impurità, che possono danneggiare il funzionamento dei dispositivi del bruciatore;
- Flangia tarata di misurazione della portata di combustibile, con trasmissione analogica di segnale al sistema di regolazione della combustione;
- Pressostato di massima pressione del gas, per proteggere le tubazioni del combustibile contro pressioni eccessivamente alte;
- Pressostato di minima pressione del gas, per bloccare l'alimentazione del combustibile nel caso il valore di pressione rilevato sia insufficiente;
- Due dispositivi di intercettazione di sicurezza motorizzate ad azione rapida, che consentono l'immediato arresto del bruciatore nel caso i parametri di regolazione siano al di fuori dei valori consentiti;

- Valvola di regolazione della portata gas, pneumatica a regolazione elettronica;
- Sistema di controllo della tenuta;
- Manometri a monte e a valle della valvola di regolazione;

L'alimentazione per il pilota di accensione è ricavata da uno stacco sulla tubazione e presenta anch'essa una valvola manuale di intercettazione e due elettrovalvole di blocco, con collegamento al sistema di controllo della tenuta.

1.2.4. Ventilatori

Le caldaie sono dotate ciascuna di un ventilatore per l'aria comburente ed un ventilatore di ricircolo dei fumi. Entrambi i ventilatori sono di tipo centrifugo, in particolare la regolazione di portata è effettuata per mezzo di:

- Serranda in aspirazione tipo dapò e inverter in split range per il ventilatore dell'aria comburente;
- Serranda in mandata e inverter in split range per il ventilatore di ricircolo fumi.

I ventilatori sono trascinati da motori elettrici asincroni, trifase a 4 poli con grado di efficienza energetica 1 e grado di protezione IP55¹. In particolare, poiché il ventilatore di ricircolo dei fumi elabora un fluido a temperatura elevata (temperatura di progetto 200°C) la trasmissione è effettuata per mezzo di cinghia e puleggia, in modo da evitare riscaldamenti eccessivi del motore elettrico.

¹ Il codice IP (International Protection) è una convenzione definita nella norma EN 60529 per individuare il grado di protezione degli involucri dei dispositivi elettrici ed elettronici (aventi tensione nominale fino a 72.5 kV) contro la penetrazione di agenti esterni di natura solida o liquida. Il grado IP55 definisce la protezione dell'involucro contro la polvere, contro l'accesso con un filo e contro i getti d'acqua.

I ventilatori sono inseriti per ogni generatore in un'apposita cabina afonica, pre-assemblata e sollevabile in modo da poterla posizionare facilmente in cima alla caldaia. La cabina è studiata in modo da realizzare un ambiente unico, tale che il flusso d'aria aspirato dal ventilatore dell'aria comburente investa il ventilatore di ricircolo fumi, consentendone il raffreddamento.

L'interno della cabina è rivestito con un apposito materiale fonoassorbente, in modo da contenere il livello di rumorosità a 75 dB(A) ad una distanza di 1 m nell'intorno della macchina.

La portata di aria comburente è determinata per mezzo di un misuratore ad *airfoil*. Quest'ultimo è particolarmente adatto a condotti rettangolari, in quanto richiedono una minore restrizione del condotto per ottenere una pressione differenziale rispetto ad un orifizio o ad un venturi e, grazie alla sua forma, determina minori perdite di carico. La lunghezza del condotto richiesta per l'*airfoil* è circa la medesima di quella richiesta da un orifizio e la metà per il venturi.

Il profilo dell'*airfoil* consiste di un cerchio avente una coda formata da due tratti rettilinei tangenti al cerchio, e intersecanti in un punto posto a 2,5 diametri dal centro del cerchio. Ciò significa che la massima profondità dell'*airfoil* è pari al diametro del cerchio, mentre la massima profondità è pari a 3 volte il diametro del cerchio.

Ogni profilo ha tre prese di pressione posizionate all'interno: sul fronte è posizionata la presa di pressione di ristagno, sull'asse di simmetria rispetto al flusso d'aria. Le altre due prese di pressione sono posizionate ai bordi esterni del profilo, nel punto di massima profondità.

Misurando la differenza di pressione fra il punto di ristagno posto sul fronte ed il punto posto alla periferia, il misuratore è in grado di determinare la portata d'aria elaborata dal ventilatore.

L'*airfoil* può inoltre essere utilizzato per miscelare la portata di gas di ricircolo con il flusso d'aria principale, mantenendo invariata la capacità di misurazione del dispositivo fintanto che la portata di ricircolo non supera il 25% della portata d'aria

elaborata. Tuttavia le perdite di carico aumentano in proporzione al quadrato del rapporto fra la portata totale (aria e ricircolo) e la portata d'aria.

I fumi di ricircolo vengono introdotti all'interno dell'*airfoil* e iniettati (o aspirati) all'interno del flusso d'aria attraverso porte rettangolari uniformemente spaziate, posizionate a valle del punto di massima profondità del profilo.

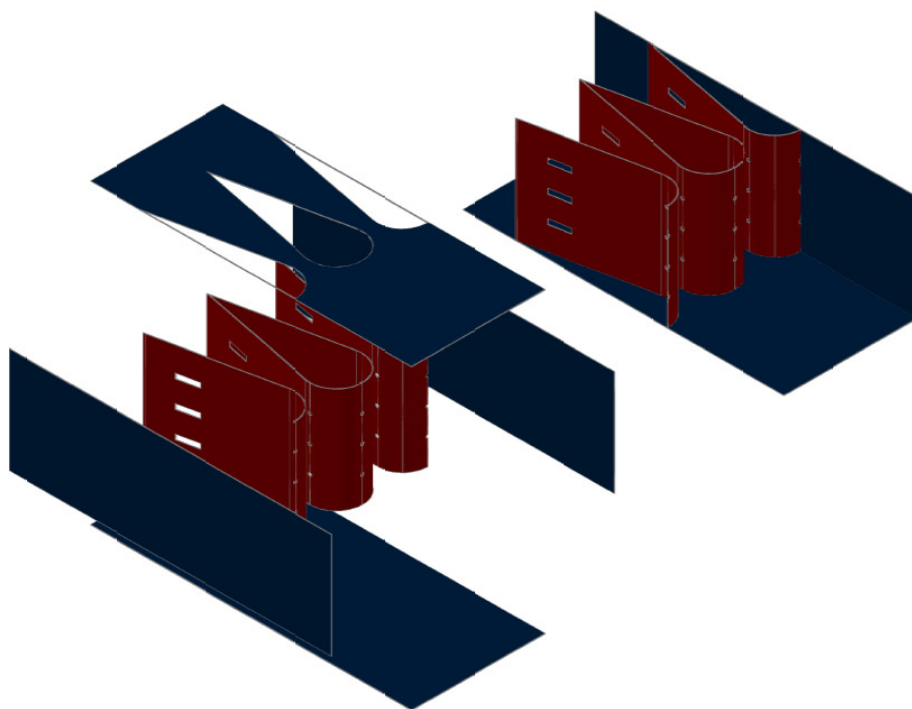


Fig. 1.4. Dispositivo di misurazione della portata ad *airfoil*

1.2.5. Quadro MCC e di controllo

Il quadro MCC (Motor Control Center) consente il comando centralizzato dei motori e degli inverter. Il quadro MCC è interfacciato al sistema DCS² per mezzo di dispositivi Profibus DP (*Decentralized Peripherals*), che consente lo scambio di dati tra periferiche remote fino ad una distanza di 300 metri.

² *Distributed Control System*, si riferisce ad un sistema di controllo del processo nel quale gli elementi di controllo non sono localizzati centralmente ma distribuiti attraverso il sistema. L'intero sistema è connesso da una rete di comunicazione e monitoraggio

Ciascun generatore è inoltre dotato dei quadri necessari per il controllo, dove si intende con ciò:

- Il sistema di controllo del bruciatore ed i sistemi di blocco e sicurezza della caldaia (BMS, *Burner Management System*);
- Il sistema di gestione e controllo della strumentazione necessaria per la conduzione del generatore senza la presenza continua (SRC, Sistema di regolazione della combustione);
- PLC³ di gestione e controllo delle funzioni

I quadri sono in grado di protezione IP44⁴ e sono idonei per l'interfaccia al DCS di centrale con comunicazione tramite Modbus RTU (Unità Terminale Remota) per consentire le attività di accensione e spegnimento e le modifiche dei set point principali di funzionamento.

A fronte quadro è previsto un pannello operatore di tipo touch screen, per la gestione delle verifiche periodiche previste per l'esenzione del conduttore 24h e la programmazione del PLC. Si rimanda all'Appendice 1 per maggiori dettagli relativamente ai requisiti normativi per la sorveglianza senza presenza continua.

Il dispositivo consente di gestire i seguenti loops di controllo:

- Temperatura dell'acqua surriscaldata;
- Portata dell'acqua in circolazione;
- Percentuale di ossigeno nei fumi;
- Grado di ricircolo dei fumi;
- Regolazione della portata di gas combustibile e aria comburente;
- Controllo del rapporto aria/metano.

³ *Programmable Logic Controller*, esegue un programma ed elabora i segnali digitali e analogici provenienti dai sensori e diretti agli attuatori presenti in un impianto industriale.

⁴ Involucro protetto contro i corpi solidi di dimensioni superiori ad 1 mm, contro l'accesso con un filo e contro gli spruzzi d'acqua.

1.3. Processo di combustione

In questo paragrafo verranno descritti brevemente i dettagli relativi al processo di combustione realizzato dai bruciatori installati sui generatori di acqua surriscaldata oggetto della tesi. In particolare verrà focalizzata l'attenzione sulla correlazione tra la generazione di un moto vorticoso dell'aria comburente da parte del registro e la formazione di prodotti inquinanti quali NO_x .

1.3.1. Formazione di inquinanti nel processo di combustione

Il livello di emissioni realizzate nel processo di combustione dipende fortemente dalle caratteristiche fisico-chimiche del combustibile utilizzato e del processo stesso, nonché dalla geometria del reattore responsabile della realizzazione della reazione chimica. Generalmente le concentrazioni di inquinanti sono molto diverse da quelle suggerite dalle equazioni di equilibrio chimico, in quanto una forte influenza deriva dalla cinetica della reazione.

Le emissioni di principale interesse per i combustibili gassosi, soprattutto dal punto di vista normativo, sono il monossido di carbonio (CO) e gli ossidi di azoto (NO_x). Il monossido di carbonio si forma in particolare nella prima zona della fiamma, per poi ossidarsi ulteriormente a CO_2 che costituisce il prodotto di ossidazione completa del carbonio contenuto nel combustibile. Il particolare l'ossidazione da CO a CO_2 è facilitata da elevate temperature e da forte concentrazione di ossigeno; bisogna pertanto evitare che la fiamma incontri pareti o zone fredde che "congelano" il CO esistente, mentre un ampio eccesso d'aria favorisce il completamento della reazione.

Diversamente si comportano, dal punto di vista del processo di formazione, gli ossidi di azoto⁵ NO_x. Si possono definire tre metodi per la generazione degli ossidi di azoto:

- “thermal” NO_x: per dissociazione e successiva ossidazione dell’azoto molecolare contenuto nell’aria comburente. Tale processo avviene per via termica, ossia è favorito dalle elevate temperature.
- “prompt” NO_x: derivano da reazioni molto veloci fra i radicali derivati dagli idrocarburi e l’azoto atmosferico.
- “fuel” NO_x: generati dall’ossidazione dell’azoto presente nel combustibile non in forma molecolare (N₂) ma legato chimicamente in forma di ciano e ammino composti da cui, alle elevate temperature, si originano specie più semplici che a loro volta si dissociano e si ossidano a NO.

Gli ultimi due metodi citati di formazione degli ossidi di azoto non hanno bisogno di elevate temperature. Inoltre, per i combustibili gassosi quali il gas metano, il meccanismo dominante è quello “thermal”. L’equazione che descrive la velocità di formazione massima dell’ossido di azoto⁶ è la seguente:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 1.45 \cdot 10^{14} T^{-1/2} \exp\left(\frac{-69490}{T}\right) [O_2]^{1/2} [N_2];$$

che mostra chiaramente la fortissima dipendenza della formazione di NO dalla temperatura dei gas combusti. Più debole, ma significativa, è la dipendenza dalla concentrazione di ossigeno, mentre la concentrazione di azoto è un parametro influente ma di scarsa importanza applicativa, essendo questo comunque largamente presente nella combustione con aria.

⁵ Sebbene le normative si riferiscano genericamente agli NO_x come NO₂, gli ossidi di azoto vengono prodotti dal processo di combustione quasi esclusivamente come NO, che vengono poi ossidati in parte con lentezza (rispetto alle velocità di reazione della combustione) a NO₂.

⁶ Espressione ottenuta dalla formulazione di Zel’dovich a tre reazioni, nell’ipotesi di concentrazione iniziale nulla dell’ossido di zoto

L'equazione sopracitata permette di trarre le seguenti raccomandazioni per ridurre la formazioni di ossidi di azoto:

- Riduzione dei picchi di temperatura in camera di combustione; è sufficiente infatti una riduzione di temperatura della fiamma di 200°C per abbassare di un ordine di grandezza la formazione di NO;
- Riduzione del tempo di residenza, compatibilmente però con il completamento dell'ossidazione del monossido di carbonio CO;
- Riduzione dell'eccesso d'aria.

Per quanto riguarda il primo punto, il combustore applicato sul generatore di acqua surriscaldata oggetto della tesi sfrutta due tecniche di abbattimento della formazione di NO per riduzione della temperatura di fiamma:

- Generazione di un moto rotatorio (swirl): questa tecnica consente un buon miscelamento fra i reagenti, e di conseguenza realizza un campo di temperatura pressoché uniforme, oltreché favorire un ricircolo interno dei gas combustibili nella zona di reazione con conseguente diluizione della miscela e riduzione della formazione di ossidi di azoto.
- Ricircolo esterno dei gas combustibili: con tale metodo i prodotti di combustione vengono miscelati con l'aria di combustione prima che questa arrivi nella zona di reazione, con un doppio effetto utile in quanto questi formano una massa di diluizione che consente la riduzione della temperatura di fiamma, con conseguente riduzione della formazione di NO. Ulteriormente il ricircolo consente il completamento delle reazioni che non erano terminate durante la prima fase di combustione.

1.3.2. Processo di combustione nei bruciatori Bono Energia

Il bruciatore di produzione Bono Energia installato sul generatore di acqua surriscaldata oggetto della tesi realizza una combustione di tipo diffusivo, ossia il

combustibile e l'aria comburente vengono alimentati separatamente e intimamente mescolati in prossimità della fiamma realizzando la miscela infiammabile.

Nelle fiamme diffusive la turbolenza gioca un ruolo fondamentale nello sviluppo della combustione, in quanto essa governa il tempo di mescolamento fluidodinamico. Essendo questo molto inferiore al tempo di reazione chimica la reazione è in realtà controllata dallo stadio lento, pertanto si rende necessario ricorrere alla turbolenza per incrementare il mescolamento dei reagenti, garantendo così una maggiore stabilità di fiamma e riducendo la formazione di prodotti inquinanti.

Le tecniche industrialmente applicate per incrementare la turbolenza sono svariate, in particolare il combustore Bono Energia utilizza il registro di vorticosità per imprimere un moto rotatorio alla aria comburente (vedi par. 1.2.3). La rotazione del getto d'aria (*swirl*) ha l'effetto di incrementare l'ampiezza del getto, facendolo espandere e quindi riducendo la velocità in direzione assiale. Tale effetto ovviamente cresce all'incrementare del grado di rotazione da parte del registro, provocando inoltre un effetto di richiamo dell'aria circostante.

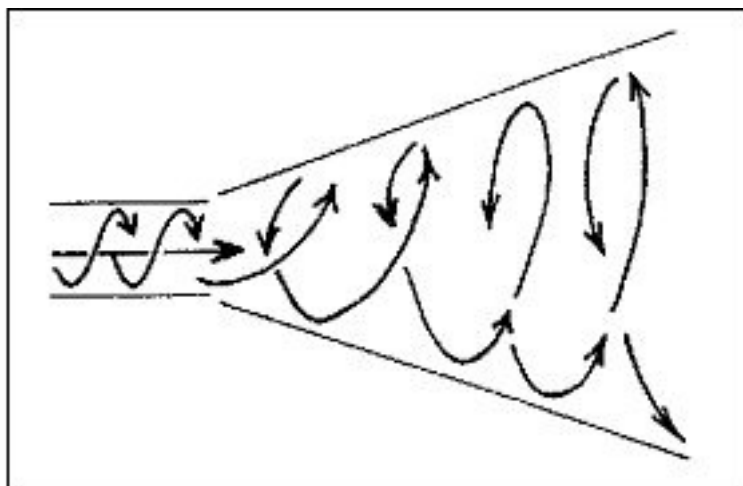


Fig. 1.5. Espansione del getto generata dal movimento rotatorio (*swirl*)

La forza centrifuga causata dal moto rotatorio genera una distribuzione di pressione in direzione radiale descritto dall'equazione di equilibrio:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho V_t^2}{r};$$

per la quale la pressione deve essere crescente con il raggio. In contemporanea la dissipazione viscosa determina una graduale diminuzione di velocità in direzione assiale, pertanto si instaura un gradiente di pressione positivo nella direzione del getto. Tali fenomeni contribuiscono a generare un moto rotatorio di ricircolo con velocità assiale negativa, che consente un incremento dei valori di turbolenza in prossimità della zona di miscelamento dei reagenti, favorendo pertanto la stabilità della combustione.

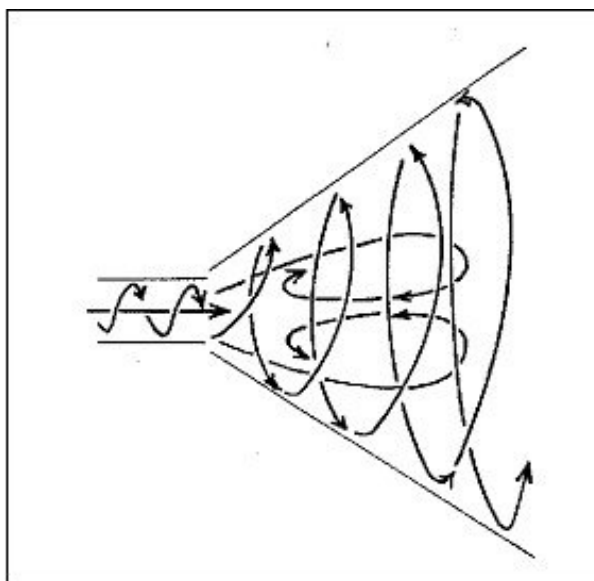


Fig. 1.6. Generazione del ricircolo interno per flussi ad elevata vorticosità

La creazione di una zona di ricircolo interno favorisce inoltre il completamento della combustione aumentando il tempo di residenza dei prodotti di combustione, oltreché ancorare la fiamma alla testa del bruciatore esclusivamente per effetto fluidodinamico.

Il moto di swirl ha inoltre l'effetto di ridurre la lunghezza della fiamma, in maniera crescente all'aumentare della velocità imposta al flusso d'aria dalle pale di registro. Un eccessivo swirl del flusso può tuttavia comportare effetti controproducenti, in particolare l'eccessivo gradiente di pressione in direzione assiale comporta uno spostamento della zona di ricircolazione, e quindi della fiamma, a monte della sezione di uscita del bruciatore.

Imprimendo al getto d'aria il grado di swirl ottimale è possibile governare la formazione di prodotti inquinanti, in quanto consente di generare una distribuzione di temperatura e di concentrazione dei reagenti uniforme in camera di combustione, evitando quei picchi di temperatura che sono la causa principale di formazione di ossidi di azoto "thermal". Tuttavia l'aumento del tempo di residenza comporta un incremento di formazione di NO_x , pertanto si rende necessario determinare il grado di vorticosità ottimale dal punto di vista della minima formazione di inquinanti.

Capitolo 2

Sistemi di regolazione del generatore

2.1. Descrizione generale

In questo capitolo si descriveranno le principali funzioni del sistema di automazione che controlla il funzionamento della caldaia ad acqua surriscaldata progettata dalla Bono Energia SpA.

Il sistema di automazione è progettato per implementare le logiche, le sequenze, le regolazioni e la supervisione allo scopo di monitorare, controllare e proteggere l'intero impianto composto dalla caldaia con bruciatore singolo a metano, dalla rampa gas, dal vaso di espansione e dal circuito idraulico di acqua surriscaldata.

Il sistema di automazione è composto dai seguenti componenti:

- Burner Management System (BMS) che controlla tutte le logiche di sicurezza dell'impianto e le sequenze di accensione del bruciatore;
- Sistema di Regolazione della Combustione (SRC) che è responsabile per le regolazioni dell'impianto.

In particolare l'SRC controlla le seguenti regolazioni:

- Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia;
- Miscela aria/combustibile;
- Percentuale di ossigeno nei fumi;
- Ricircolo dei fumi di scarico;
- Portata d'acqua nel circuito;
- Avviamento, arresto dei ventilatori.

Il BMS controlla le sequenze di avviamento e arresto della caldaia, in particolare:

- Lavaggio del circuito aria comburente e ricircolo fumi;
- Accensione;

- Test di tenuta delle valvole di alimentazione del combustibile;
- Spegnimento e shut-down;
- Post-lavaggio del circuito aria comburente e ricircolo fumi;
- Gestione dei test per esonero del conduttore.

Inoltre il BMS è responsabile dei segnali che causano il blocco del bruciatore in caso di anomalia, quindi tutti i segnali ritenuti critici per il funzionamento di una caldaia sono portati alle schede I/O del BMS che, in base alle condizioni operative del sistema, monitora tali segnali e protegge la caldaia.

Nel paragrafo 2.2 verrà descritto lo schema di processo del generatore, descrivendo nel dettaglio la strumentazione che consente al sistema di automazione di controllare i principali parametri di processo. Nel paragrafo 2.3 verrà descritto nello specifico il funzionamento del BMS e le sequenze automatiche da esso gestite, mentre nel paragrafo 2.3 verranno trattate le logiche di regolazione implementate nell'SRC.

2.2. Schema di processo

Nei paragrafi seguenti verranno descritti nel dettaglio i singoli componenti e le relative funzioni.

2.2.1. Alimentazione combustibile

Nella figura seguente è rappresentata la linea di alimentazione del combustibile e la relativa strumentazione.

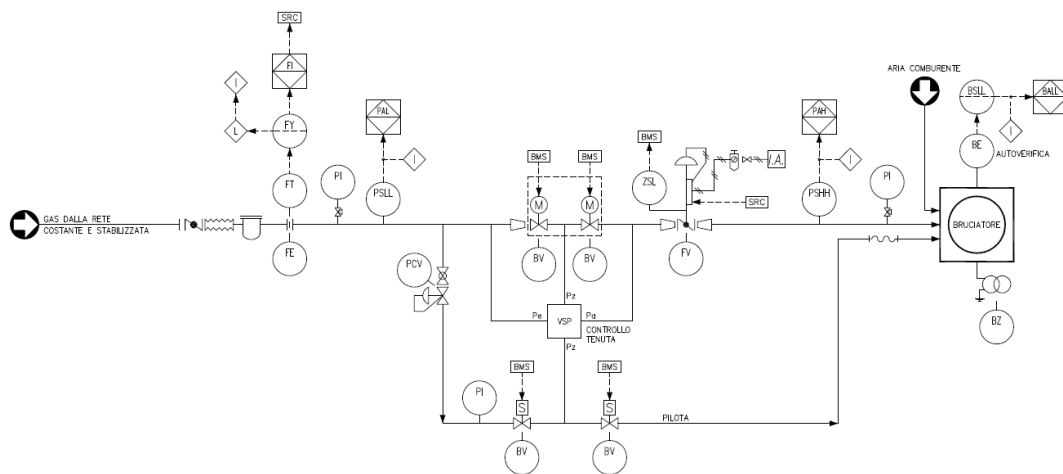


Fig. 2.1. Linea di alimentazione del combustibile

La portata di metano viene letta dalla flangia tarata FE ed il segnale è inviato tramite il trasmettitore FT ed utilizzato come variabile di processo dall'SRC per la regolazione. La pressione del gas a monte e a valle delle valvole di blocco e della valvole di regolazione è osservabile per mezzo di due manometri installati sulla linea di alimentazione, mentre un pressostato di massima ed uno di minima pressione (PSHH e PSLL) verificano che la pressione del gas di alimentazione e del gas in ingresso al bruciatore sia contenuta all'interno del range impostato sul pannello di controllo. Se tale pressione esce dal range operativo del generatore interviene la condizione di blocco e viene visualizzato il relativo allarme a pannello. Le elettrovalvole di blocco BV sono controllate dal BMS sia durante la fase di controllo di tenuta (vedi par. 2.3.2) sia per intervento di una condizione di blocco che determini l'arresto del bruciatore, mentre la portata è regolata dall'SRC per mezzo di una valvola pneumatica (FV) del tipo "normalmente chiusa".

La linea di alimentazione del pilota è costituita dalla valvola riduttrice PCV e dalle due elettrovalvole di blocco BV, anch'esse controllate dal BMS similmente alle valvole di blocco principali.

L'accensione della fiamma pilota è consentita dal trasformatore BZ, mentre la fotocellula BE verifica in continuo la presenza della fiamma. In caso di mancanza della fiamma interviene la condizione di blocco ed il relativo allarme è visualizzato a pannello operatore. La fotocellula realizza periodicamente un'autoverifica di funzionamento, oscurando il sensore in modo da verificare che il segnale venga generato solo in presenza della fiamma.

2.2.2. Aria comburente

L'aria comburente è fornita al bruciatore per mezzo di un ventilatore centrifugo, dopo essere stata premiscelata con i gas di ricircolo prelevati dalla base del camino e preriscaldati attraverso lo scambiatore di calore. La linea è rappresentata nella figura seguente.

La regolazione dell'aria comburente avviene per mezzo di una serranda tipo dapò FV posizionata in aspirazione e l'inverter SIC. La posizione della serranda è inviata per mezzo del trasmettitore ZT all'SRC, il quale comanda il servomotore M in base alla richiesta di potenza. Similmente l'SRC comanda l'inverter SIC in base alla richiesta di potenza. I finecorsa di minimo ZSL intervengono durante la fase di lavaggio inviando un segnale al BMS (si veda il par. 2.3.1).

Il valore della portata d'aria fluente è misurato tramite il misuratore FE, ed il segnale è inviato tramite il trasmettitore FT all'SRC durante il funzionamento del generatore per la regolazione. Durante la fase di avviamento lo stesso segnale passa per i finecorsa di minimo FSLL che, se disattivi, determinano la condizione di blocco interrompendo la sequenza di avviamento.

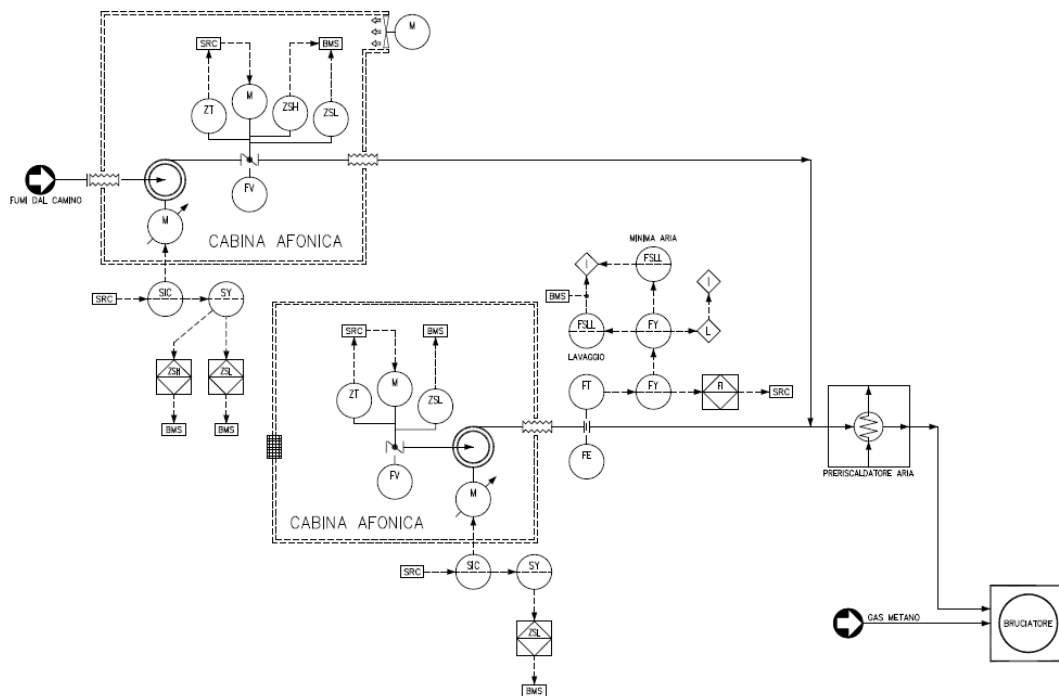


Fig. 2.2. Alimentazione aria comburente e ricircolo fumi

La regolazione del ricircolo fumi avviene per mezzo della serranda in mandata FV e dell'inverter SIC similmente al ventilatore dell'aria comburente. Una differenza sostanziale è dovuta all'assenza di una misura puntuale di portata che determina la necessità di dotare il sistema di due fincorsa di massimo ZSH, in modo da garantire durante la fase di lavaggio un flusso di aria sufficiente a completare con successo l'operazione.

I fumi di ricircolo si miscelano all'aria di comburente prima di accedere al preriscaldatore, per poi essere convogliati al bruciatore.

2.2.3. Generatore e linea acqua surriscaldata

La strumentazione rappresentata in fig. 2.3 consente la regolazione della portata d'acqua in caldaia e l'esecuzione dei test di verifica richiesti dalla normativa relativa alla gestione con esonero da presenza continua del conduttore. Si veda l'Appendice 1 per maggiori approfondimenti relativi all'ultimo punto.

Misuratori di pressione e temperatura sono installati all'alimentazione e alla mandata del generatore per verificare puntualmente le caratteristiche dall'acqua. In particolare il sensore TE sulla mandata invia un segnale al regolatore TIC che determina la richiesta di potenza totale necessaria alla caldaia per raggiungere il set point di temperatura impostato. È prevista inoltre una funzione di stand-by della caldaia, che richiede l'arresto temporaneo del bruciatore al BMS qualora la temperatura dell'acqua surriscaldata in uscita dal generatore superi una soglia impostata (TSH).

Un sensore di pressione differenziale (PDSLL) verifica la presenza di circolazione dell'acqua in caldaia misurando la perdita di carico fra l'ingresso e l'uscita: se tale valore scende al di sotto di una soglia impostata significa che la circolazione d'acqua è insufficiente a garantire il raffreddamento dei tubi e conseguentemente l'integrità del generatore, pertanto interviene una condizione di blocco.

Il generatore è dotato di due dispositivi di sicurezza (PSV) posizionati in zona di sicurezza, per prevenire il funzionamento della caldaia in condizioni di sovrappressione. La capacità di scarico totale certificata di tutti i dispositivi di sicurezza installati sul generatore deve essere almeno uguale alla massima potenzialità continua della caldaia. In particolare devono essere progettati in modo che il flusso di vapore corrispondente alla portata termica consentita possa essere scaricato senza che la pressione massima del generatore ecceda del 10%.⁷

⁷ Riferimento normativo: UNI EN 12952-10:2005, Caldaie a tubi d'acqua e installazioni ausiliarie. Requisiti per la protezione dagli eccessi di pressione.

L'impianto è dotato di un vaso di espansione in grado di compensare le variazioni di volume dipendenti dalla temperatura nel generatore di acqua surriscaldata, per garantire che il sistema rimanga entro i limiti di progetto.

Al fine di poter operare in modalità di esercizio in assenza del conduttore in completa sicurezza, il generatore è dotato di opportuni dispositivi di protezione⁸:

- Una termoresistenza (TE) che invia un segnale ad un termostato autocontrollato⁹ (TSHH) per la verifica di superamento della soglia massima prestabilita di temperatura dell'acqua surriscaldata
- Una termostato per la verifica di superamento della soglia massima prestabilita di temperatura dell'acqua surriscaldata (TSHH)
- Un pressostato per la verifica del superamento della soglia di pressione massima prestabilita dell'acqua surriscaldata (PSHH)
- Un trasmettitore di pressione (PT) per la verifica del raggiungimento della soglia di pressione massima impostata (PSHH)
- Un pressostato per la verifica del raggiungimento della soglia di pressione minima prestabilita dell'acqua surriscaldata (PSLL)
- Un livellostato per la verifica del raggiungimento della soglia di livello prestabilita del vaso di espansione (LSLL)
- Un pressostato per la verifica del raggiungimento della soglia di pressione minima prestabilita del vaso di espansione (PSLL)
- Una flangia tarata di misura (FE) collegata ad un trasmettitore di pressione differenziale (FT) per la verifica del raggiungimento della soglia minima prestabilita di circolazione dell'acqua surriscaldata (FSLL)

⁸ Riferimento normativo: UNI EN 12952-7:2005, Caldaie a tubi d'acqua e installazioni ausiliarie. Requisiti per l'apparecchiatura delle caldaie.

⁹ Il termostato è dotato di un relè autocontrollato il quale, ad intervalli regolari, esegue un controllo di buon funzionamento del dispositivo simulando per via elettrica le condizioni di intervento dello stesso

- Un sistema di rilevazione della fiamma

Il segnale del trasmettitore di pressione differenziale FT è inoltre utilizzato come variabile di processo dal regolatore FIC, il quale va a comandare direttamente il variatore di frequenza della pompa P1.

Al camino sono infine installati una termoresistenza (TE), per la verifica del superamento di una soglia massima di temperatura dei fumi, ed un analizzatore della composizione di ossigeno nei fumi (AE), che genera un segnale inviato all'SRC per la regolazione della combustione.

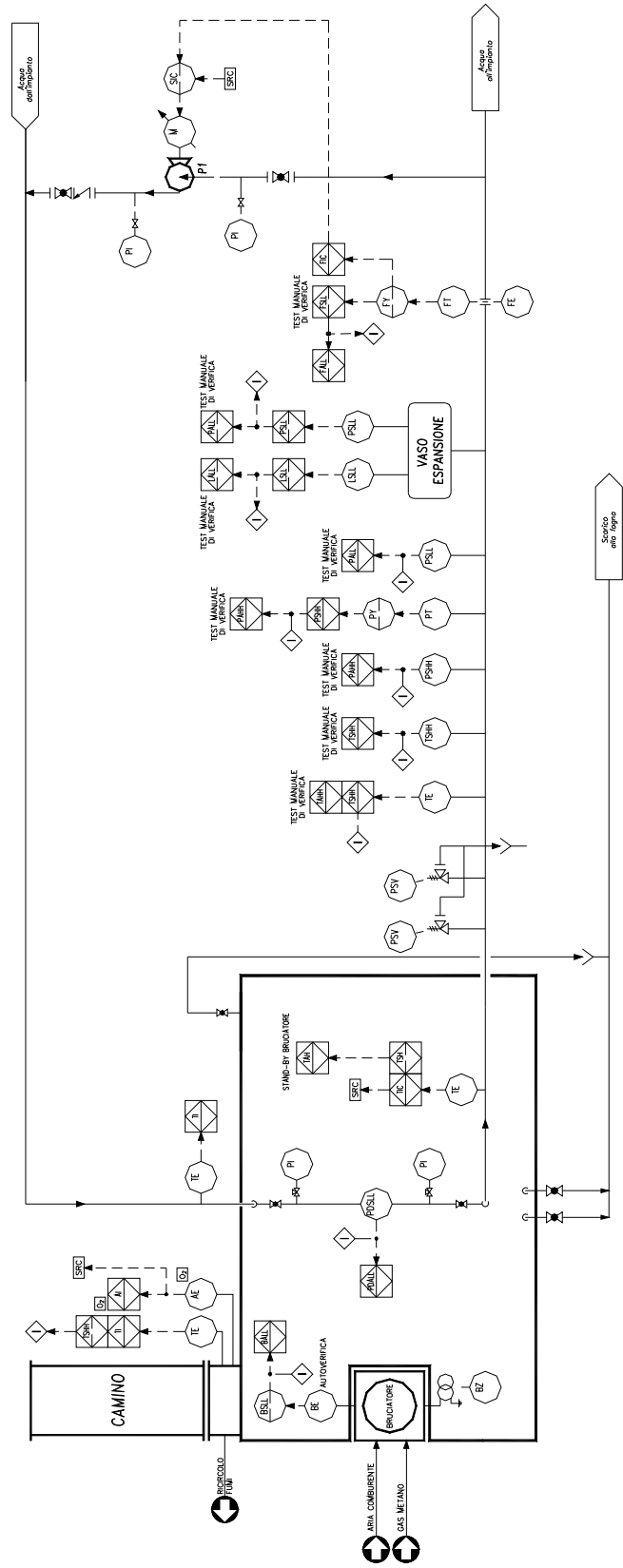


Fig. 2.3 Schema di processo generatore e linea acqua surriscaldata

2.3. Burner Management System (BMS)

2.3.1. Sequenza di lavaggio

E' importante notare che a monte dell'avviamento della sequenza di lavaggio l'operatore deve rimuovere tutte le cause di blocco presenti¹⁰.

Affinchè la sequenza di lavaggio abbia inizio devono essere verificate le seguenti condizioni:

- Bruciatore spento;
- Serranda aria al minimo (finecorsa di minimo attivo)
- Assenza di shut-down;
- Valvola di regolazione del gas al minimo (finecorsa di minimo attivo)

Se tali controlli danno esito positivo, il sistema fornisce il “Consenso alla marcia” ed inizia la sequenza di accensione.

Quando l'operatore impartisce il comando di marcia il BMS questo recepisce il comando ed effettua la “Richiesta marcia ventilatore aria di combustione”, quindi resta in attesa 15 secondi che dal quadro MCC arrivi la segnalazione di “Ventilatore aria di combustione in marcia” e, in caso di esito positivo, il BMS:

- Effettua la “Richiesta di lavaggio aria di combustione”;
- Avvia il test di tenuta delle valvole di blocco principali;
- Avvia il test di tenuta delle valvole di blocco sulla linea del pilota.

Si vedano il paragrafo 2.3.2 relativamente agli ultimi due punti.

Se entro 15 secondi dalla richiesta di marcia il BMS non riceve alcun segnale emette il blocco “Ventilatore aria di combustione non in marcia”, rimuove il segnale di “Richiesta marcia ventilatore aria di combustione” e ritorna al punto iniziale delle sequenza.

¹⁰ La normativa UNI/TS 11325/3:2010 definisce la situazione di blocco come “Interruzione dell'alimentazione della fonte di energia termica che richiede un intervento manuale dell'operatore”

Viceversa se il segnale di marcia del ventilatore è attivo ed è stabile il BMS prosegue la sequenza, e da questo punto in poi verifica continuamente la presenza del segnale “Ventilatore aria di combustione in marcia”. Se tale segnale dovesse mancare, il BMS emetterebbe la relativa segnalazione di blocco come descritto in precedenza ed interromperebbe la sequenza tornando al punto iniziale.

A questo punto il DCS deve:

- Comandare la serranda dell’aria di combustione alla soglia di apertura impostata (tipicamente l’80%);
- Comandare l’inverter di frequenza del motore del ventilatore dell’aria di combustione alla soglia di percentuale di velocità di rotazione impostata (tipicamente l’80%).

Il BMS attende 45 secondi dall’emissione del segnale di “Richiesta di lavaggio aria di combustione” e poi verifica che la portata dell’aria letta tramite l’apposito trasmettitore sia al di sopra di una soglia minima impostata per il lavaggio.

Se la condizione precedente non è soddisfatta, a partire da questo punto e per tutta la fase di lavaggio, il BMS emette la segnalazione di blocco “Bassa portata aria di combustione durante lavaggio”, rimuove i segnali di richiesta lavaggio e marcia del ventilatore e torna al punto iniziale della sequenza.

Se viceversa la condizione è soddisfatta il BMS attende il tempo di lavaggio del circuito aria pari ad un minuto e poi, se la serranda di ricircolo dei fumi è posizionata all’apertura minima, attiva il segnale “Richiesta marcia ventilatore ricircolo fumi”.

Il BMS attende 10 secondi dell’emissione del segnale e verifica la presenza della segnalazione proveniente dall’MCC di “Ventilatore ricircolo fumi in marcia”. Se tale segnale non arriva esso emette il blocco “Ventilatore ricircolo fumi non in marcia”, rimuove i segnali di richiesta lavaggio e marcia dei ventilatori e ritorna al punto iniziale della sequenza.

Se il segnale proveniente dall’MCC è presente e stabile entro i 10 secondi il BMS attiva il segnale “Richiesta lavaggio ricircolo fumi”. A questo punto il DCS deve

comandare la velocità del ventilatore di ricircolo fumi e l'apertura della serranda alla soglia di lavaggio impostata, tipicamente pari all'80%.

Il BMS attende 45 secondi dall'emissione del segnale di richiesta di lavaggio e verifica che la velocità di rotazione del ventilatore di ricircolo sia maggiore di una soglia impostata sul pannello operatore e che il finecorsa di massimo sia attivo. Se tali condizioni non sono verificate, a partire da questo momento e per tutta la durata della fase di lavaggio, il BMS genera la segnalazione di blocco per incongruenza di una delle condizioni sopracitate, rimuove i segnali di richiesta di lavaggio e marcia dei ventilatori e torna al punto iniziale della sequenza. Se viceversa la condizione è verificata il BMS attende il tempo di lavaggio del ricircolo fumi, fissato a 30 secondi.

A questo punto il BMS è pronto ad ultimare la sequenza di lavaggio, quindi:

- Rimuove il segnale di richiesta di lavaggio dell'aria di combustione;
- Rimuove il segnale di richiesta di lavaggio del ricircolo fumi.

A questo punto il DCS deve:

- Portare l'apertura della serranda dell'aria di combustione al valore minimo per l'accensione;
- Portare la velocità del ventilatore dell'aria di combustione al valore minimo per l'accensione;
- Portare la velocità del ventilatore di ricircolo fumi al valore minimo per l'accensione.

Il BMS attende 45 secondi e poi verifica che le condizioni sopra citate siano effettuate (ossia che i finecorsa di minimo siano attivi) e si predispongono automaticamente alla sequenza di accensione (light off) del bruciatore. Se ciò non avviene il BMS emette il blocco per incongruenza di una delle condizioni sopracitate e ripristina la sequenza al punto iniziale.

In fig. 2.4 è riportato uno schema di flusso della sequenza di lavaggio qui descritta.

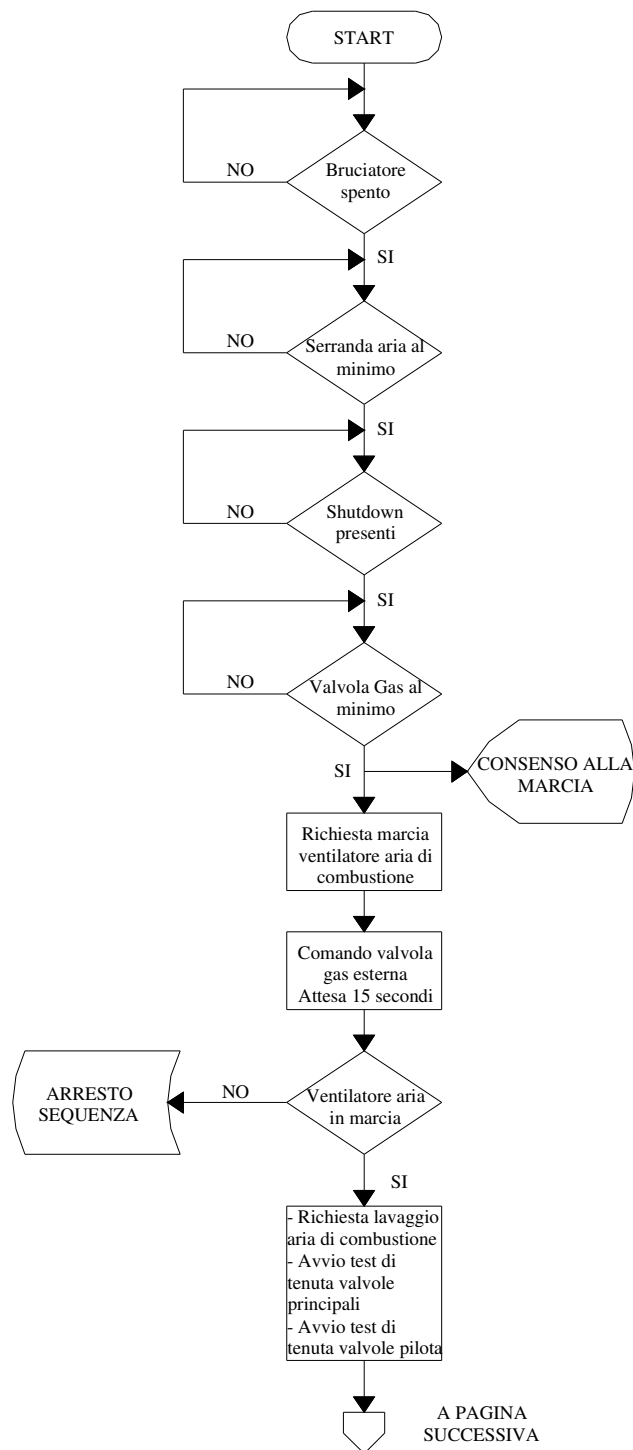


Fig. 2.4.a. Flow chart fase lavaggio

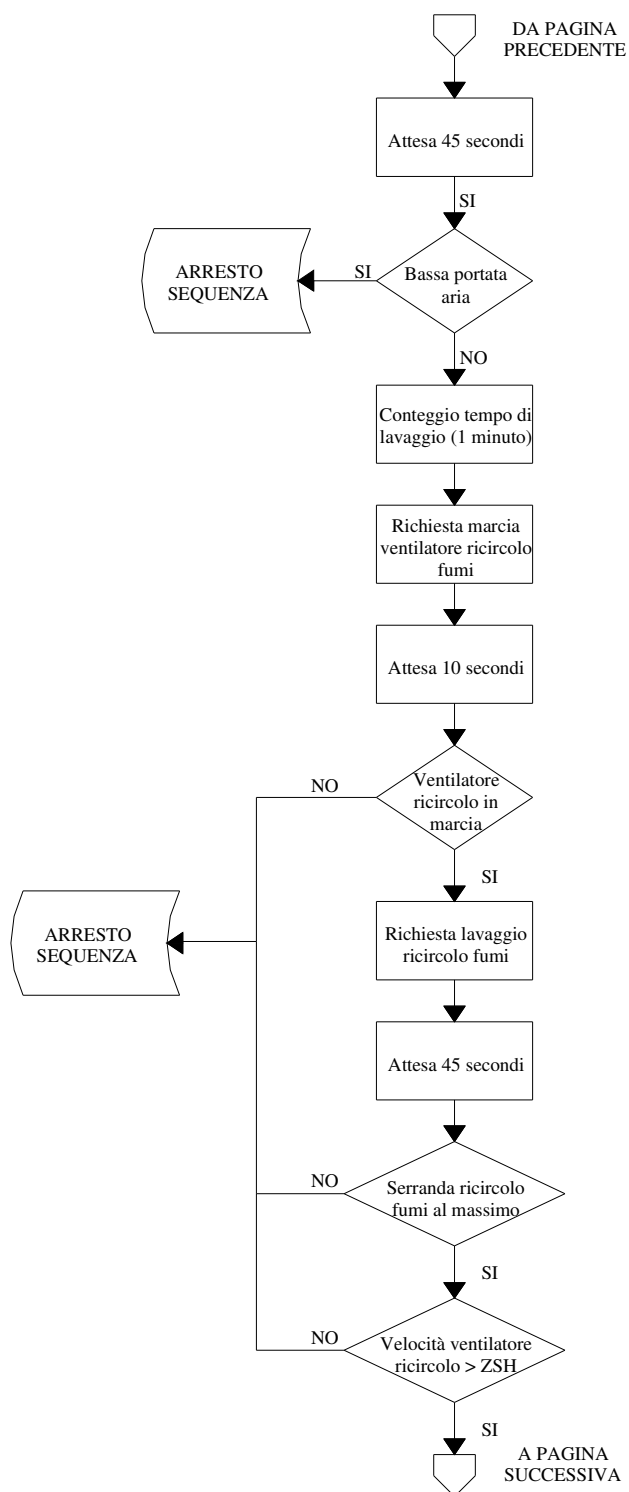


Fig. 2.4.b. Flow chart fase lavaggio

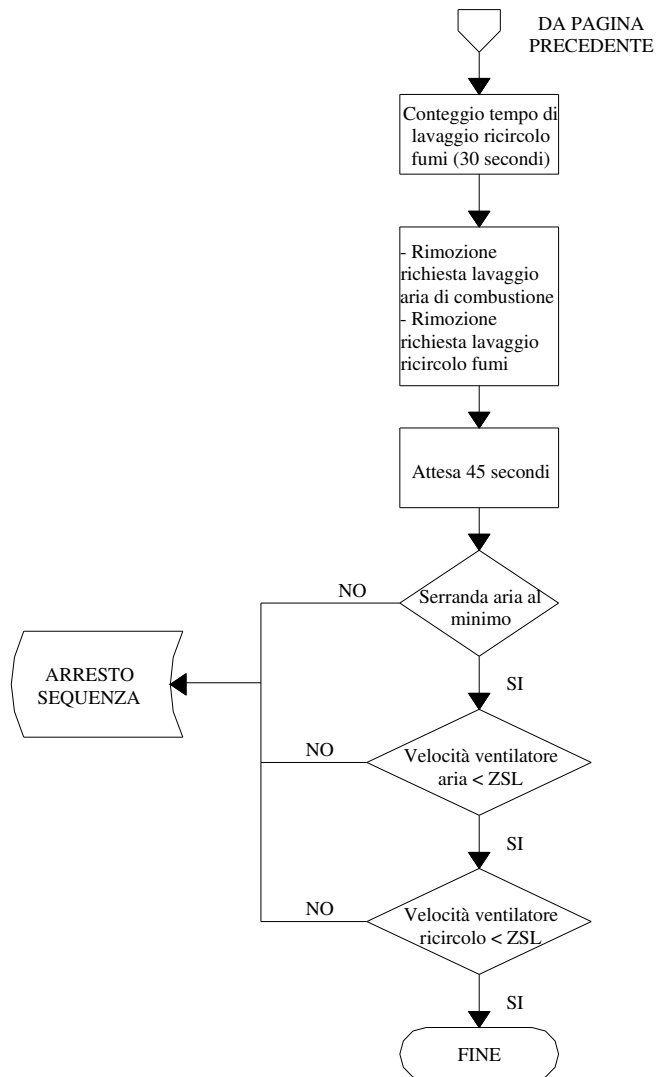


Fig. 2.4.c Flow chart fase lavaggio

2.3.2. Sequenza test di tenuta valvole combustibile

Il test di tenuta delle valvole principali e pilota del combustibile viene richiesto in automatico dal BMS ogni volta che l'operatore avvia la sequenza di accensione del bruciatore, ma viene eseguito da un dispositivo esterno installato in prossimità della rampa gas. Tale sequenza viene condotta in parallelo alla sequenza di lavaggio in quanto la durata del test di tenuta delle valvole è comunque più breve dell'intera sequenza di lavaggio.

Resta inteso che se durante i passi della sequenza di test di tenuta delle valvole una sola delle verifiche effettuate dovesse dare esito negativo, verrebbe arrestata sia la sequenza di test tenuta valvole che la sequenza di lavaggio. Allo stesso modo, se dovesse intervenire un blocco derivante dalla sequenza di lavaggio, anche la sequenza di test tenuta valvole verrebbe annullata.

Il dispositivo di controllo di tenuta realizza un collegamento fisico fra la pressione a monte della prima valvola (P_e), fra le due valvole (P_z) e a valle della seconda valvola (P_a). Inizialmente le valvole sono chiuse, pertanto il dispositivo misura la pressione a monte e deve misurare una pressione nulla tra le due valvole. Se tale condizione è verificata il test di tenuta sulla prima valvola è avvenuto con successo. Terminata la prima fase il dispositivo apre il collegamento fra il punto a monte ed il punto intermedio, pressurizzando il tratto di linea tra le due valvole, quindi verifica che la pressione a valle della seconda valvola sia nulla. Se ciò avviene anche il secondo test di tenuta è avvenuto con successo.

2.3.3. Sequenza di accensione

Terminate con successo le sequenza di lavaggio e controllo tenuta, il BMS procede all'esecuzione della sequenza di accensione come segue: il BMS attende 5 secondi per la stabilizzazione della portata dell'aria di combustione, dopodiché attiva il trasformatore d'accensione BZ. Quindi attende 2 secondi, dopodiché comanda l'apertura delle valvole pilota.

Il BMS attende 3 secondi e poi verifica la presenza della fiamma attraverso la fotocellula BE. Se quest'ultima non rileva la fiamma con le valvole del gas aperte il BMS emette la segnalazione di blocco "Incongruenza fotocellula fiamma", chiude le valvole di blocco pilota, interrompe la sequenza di accensione e rimuove le richieste di marcia del ventilatore, tornando al punto iniziale della sequenza di lavaggio.

Se invece la fiamma pilota è accesa il BMS attende 5 secondi per la stabilizzazione della fiamma pilota, dopodiché comanda lo spegnimento del trasformatore d'accensione.

Dopo 5 secondi dallo spegnimento del trasformatore (stabilizzazione della fiamma con solo pilota) il BMS apre le valvole di blocco principali. Se la fotocellula non rileva la fiamma con le valvole del gas aperte il BMS emette la segnalazione di blocco "Incongruenza fotocellula fiamma", comanda la chiusura delle valvole di blocco metano principale e pilota, interrompe la sequenza di accensione e avvia la sequenza di post-lavaggio.

Se la fiamma è presente il BMS attende 5 secondi (stabilizzazione con sovrapposizione di pilota e principali) e poi comanda la chiusura delle valvole di blocco pilota.

Se in ogni momento a partire da ora la fotocellula non rileva la fiamma il BMS esegue la sequenza di post-lavaggio (vedi par. 2.3.4)

Il BMS attiva quindi il segnale "Caldaia accesa", attende 10 secondi e poi emette il segnale "Consenso alla modulazione". Da questo momento in avanti il BMS verifica il ratio derivante dalle misure della portata metano e aria di combustione. Se il ratio dovesse scendere al di sotto del valore 1 il BMS avvierebbe la sequenza di post-lavaggio.

In fig. 2.5 è riportato lo schema di flusso della sequenza di accensione.

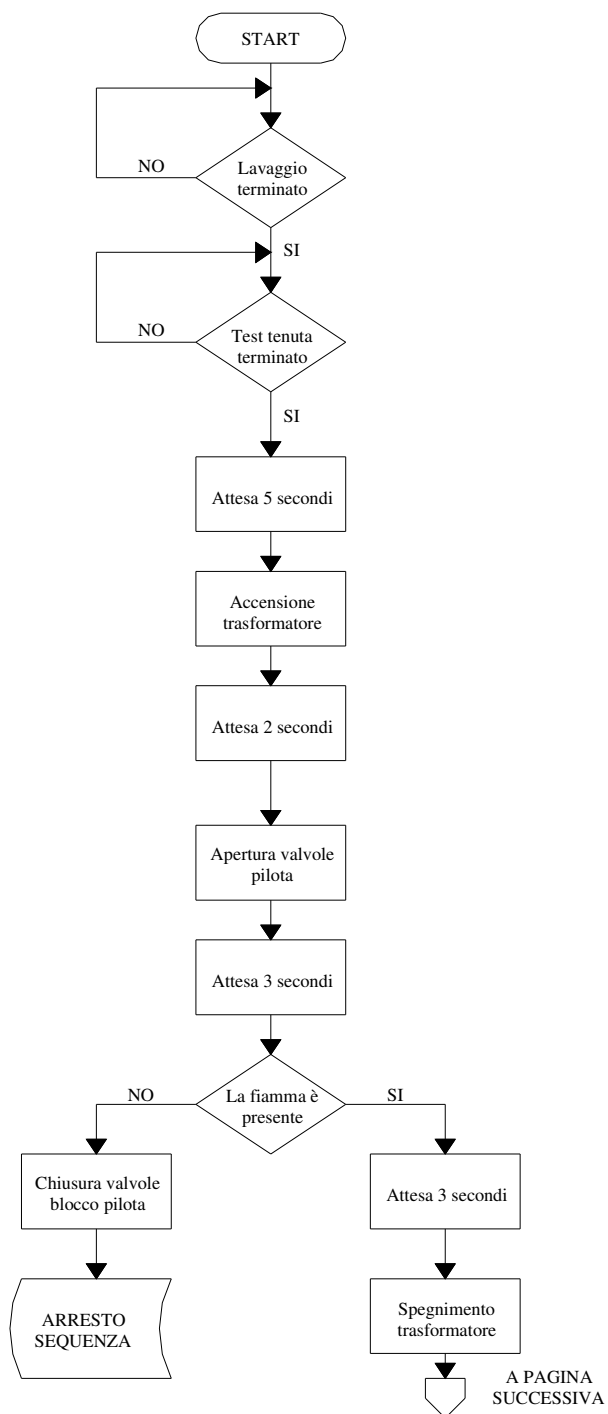


Fig. 2.5.a Flow chart sequenza accensione

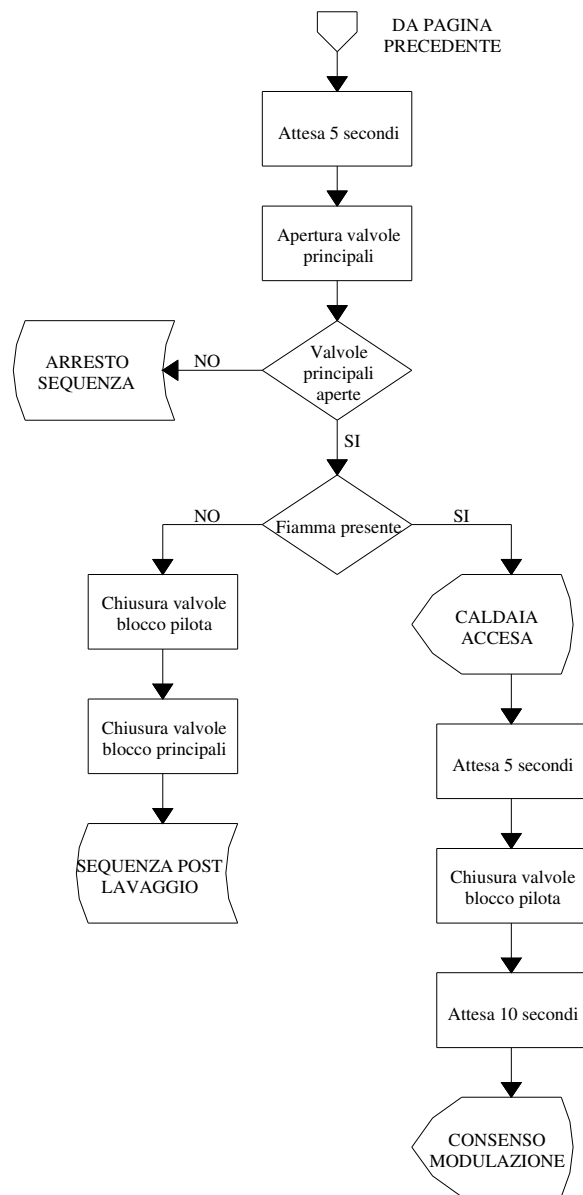


Fig. 2.5.b Flow chart sequenza accensione

2.3.4. Sequenza di post-lavaggio

La sequenza di post-lavaggio viene attivata quando sono verificate le seguenti condizioni:

- Le valvole principali del gas sono aperte;
- Interviene una condizione di blocco.

Durante l'esecuzione della sequenza di post-lavaggio, se l'operatore imposta il comando di marcia del bruciatore, la sequenza di post-lavaggio viene interrotta ed il BMS passa all'esecuzione della sequenza di lavaggio.

La sequenza di post-lavaggio viene eseguita dal BMS tramite i seguenti passi:

- emette la segnalazione relativa alla causa che ha scatenato il blocco caldaia;
- rimuove i segnali di "Caldaia accesa" e "Consenso alla modulazione";
- chiude le valvole principali di blocco del gas metano;
- avvia il conteggio del tempo di post-lavaggio (5 minuti);
- invia la "Richiesta di lavaggio dell'aria di combustione".

A questo punto il DCS dovrebbe comandare la serranda dell'aria di combustione ed il variatore di frequenza del motore del ventilatore aria di combustione alla soglia di percentuale impostata (tipicamente l'80%).

Il BMS attende 45 secondi dall'emissione del segnale di richiesta di lavaggio aria di combustione e poi verifica che la portata dell'aria di combustione letta dal trasmettitore sia al di sopra di una soglia minima impostata per il lavaggio.

Se la condizione precedente non è soddisfatta il BMS genera la segnalazione di allarme "Bassa portata aria di combustione durante il lavaggio" e procede con la sequenza di post-lavaggio. Viceversa attende il tempo di lavaggio principale (1 minuto) e poi emette la "Richiesta lavaggio ricircolo fumi".

A questo punto il DCS dovrebbe comandare la velocità del ventilatore di ricircolo fumi e l'apertura della serranda alla soglia impostata (tipicamente l'80%).

Il BMS attende 45 secondi dall'emissione del segnale di richiesta di lavaggio del ricircolo fumi e poi verifica che le condizioni precedenti siano rispettate. Se ciò non

avviene il BMS genera la segnalazione di allarme corrispondente e procede con la sequenza di post-lavaggio.

Il BMS attende il tempo di lavaggio del ricircolo fumi (30 secondi), quindi rimuove i segnali di richiesta di lavaggio aria e ricircolo fumi. A questo punto il DCS dovrebbe:

- portare l'apertura della serranda dell'aria di combustione al valore minimo per l'accensione;
- portare la velocità del ventilatore dell'aria di combustione al valore minimo per l'accensione;
- portare la velocità del ventilatore di ricircolo fumi al valore minimo per l'accensione.

Il DCS attende che il finecorsa di minimo della serranda dell'aria sia attivo e che la velocità di rotazione del ventilatore di ricircolo fumi sia inferiore ad una soglia impostata, quindi rimuove i segnali di richiesta marcia dei ventilatori. Se le verifiche non danno esito positivo il BMS attende comunque 45 secondi, dopodiché emette una segnalazione di allarme e rimuove i segnali, quindi arresta i ventilatori terminando la sequenza di post-lavaggio.

2.4. Sistema di regolazione della combustione (SRC)

Il Sistema di Regolazione della combustione è responsabile delle seguenti regolazioni:

- Regolazione della miscela aria combustibile;
- Regolazione del ricircolo fumi;
- Regolazione della percentuale di ossigeno nei fumi;
- Regolazione della temperatura dell'acqua surriscaldata in uscita dalla caldaia;
- Regolazione della portata d'acqua nel circuito caldaia;
- Avviamento / arresto dei generatori;

2.4.1. Controllo di combustione – Master di temperatura

Obiettivo di questa regolazione è quello di mantenere costante la temperatura dell'acqua surriscaldata in uscita dalla caldaia, prossima ad un valore di set point modificabile dall'operatore.

La temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia è misurata attraverso la termocoppia TE che invia il segnale al regolatore (PID) TIC, il quale determina la richiesta di potenza totale necessaria alla caldaia per raggiungere il set point.

L'uscita del TIC è una richiesta di potenza il cui valore è compreso nell'intervallo $0 \div 13.3$ MW. L'uscita è inviata ad un limitatore di velocità che non è altro che un filtro che ha lo scopo di impedire ampie variazioni di carico richiesto in tempi brevi. Infatti variazioni veloci del carico potrebbero creare problemi alla stabilità della fiamma o addirittura danneggiare la parte meccanica della caldaia, a causa delle repentine dilatazioni termiche. I parametri del filtro sono 2 impostabili attraverso l'SRC: DELTA (MW) e TIME (sec).

La logica di tale filtro prevede che, anche se l'uscita del regolatore TIC avesse variazioni rapide, al massimo la richiesta di carico (verso i regolatori di gas e aria) possa variare con una velocità massima data dal rapporto DELTA/TIME. Valori tipici di tali parametri sono un DELTA pari all'80% del carico massimo in un tempo TIME pari a 60 secondi.

Va specificato che finchè il BMS non invia il segnale di “Consenso alla Modulazione” (vedi par. 2.3.3) il TIC è mantenuto in tracking alla minima uscita. Quando l'accensione del bruciatore è andata a buon fine ed il BMS dà il consenso alla modulazione, allora il TIC viene sganciato dal tracking ed inizia a modulare tentando di mantenere il set point impostato.

In fig. 2.6 è riportato lo schema descritto.

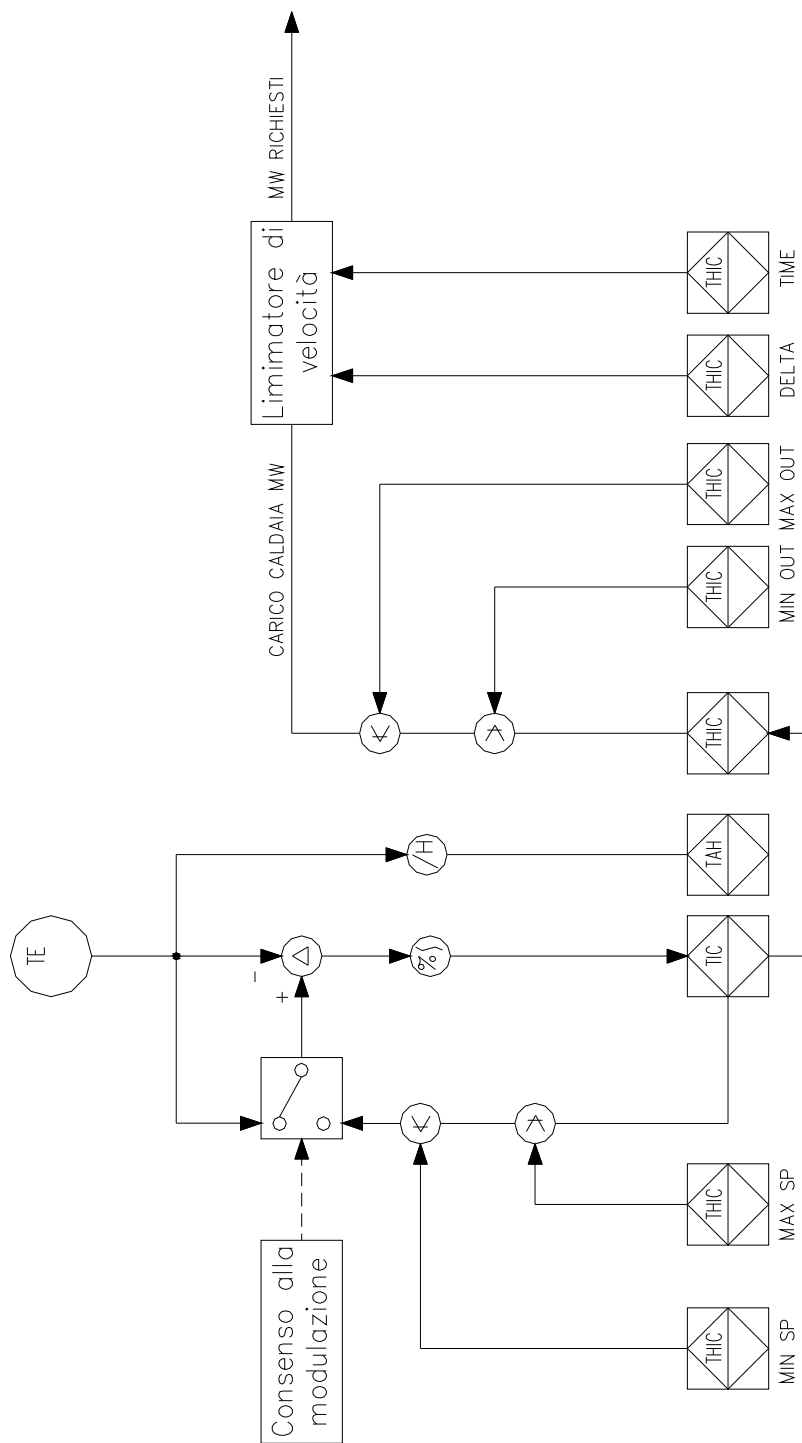


Fig. 2.6. Controllo di combustione – Master di temperatura

2.4.2. Portata metano

La richiesta di MW del regolatore viene utilizzata per il calcolo del set point dinamico del regolatore della portata gas e conseguentemente della portata di aria di combustione.

La richiesta di carico in MW viene convertita nella corrispondente quantità di combustibile necessaria dividendola per il potere calorifico del metano (kJ/Nmc) in base alla formula:

$$Q_{NG} = \frac{10^3 \times MW \times 3600}{HV};$$

dove MW è la potenza richiesta dal regolatore TIC espressa appunto in MW e HV è il potere calorifico inferiore del metano utilizzato in centrale espresso in kJ/Nmc.

La quantità di combustibile richiesta in Nmc/h è inviata ad un blocco passa basso che seleziona la minore tra la quantità richiesta dal regolatore master e la quantità di gas stechiometrica necessaria per l'attuale quantità di aria disponibile. L'uscita di questo blocco diventa il set point al regolatore di portata del metano FIC.

Inoltre la quantità Q_{NG} passa attraverso un blocco passa alto insieme all'attuale portata di gas metano e, opportunamente moltiplicata per il rapporto stechiometrico aria/metano, diventa il set point del regolatore di portata della portata aria di combustione FIC.

Obiettivo di questi blocchi passa basso e passa alto è quello di garantire in qualunque momento il corretto rapporto aria/metano al fine di ridurre il più possibile la presenza di gas incombusti e quindi di massimizzare la resa di combustione. Tale funzionalità è efficace soprattutto durante i cambi di carico. Questi filtri non permettono infatti al set point del metano di incrementare fino a quando la portata di aria non ha raggiunto il valore desiderato e, allo stesso modo, non permettono al set point dell'aria di combustione di diminuire fino a quando la portata del metano non ha raggiunto il valore richiesto. Si rimanda al capitolo 3 per maggiori dettagli.

La portata del metano viene letta tramite il trasmettitore FT ed il risultato viene inviato come variabile di processo al regolatore del metano FIC. L'uscita del regolatore opportunamente filtrata va ad agire direttamente sulla valvola di regolazione del metano FV.

Durante le varie condizioni operative su tale regolatore sono attive delle azioni di forzatura:

- Fino a quando il segnale proveniente dal BMS “Consenso alla modulazione” è disattivato, il regolatore FIC viene mantenuto in tracking e la sua uscita è forzata al valore minimo di accensione;
- Il regolatore viene inoltre forzato in tracking quando, durante le diminuzioni di carico, il rapporto aria/gas si discosta dal valore richiesto di più del 10%; durante tale fase di tracking l'uscita del regolatore di portata del gas viene congelata all'ultimo valore misurato.

In fig. 2.7 è rappresentato il loop di processo per il controllo della portata di metano.

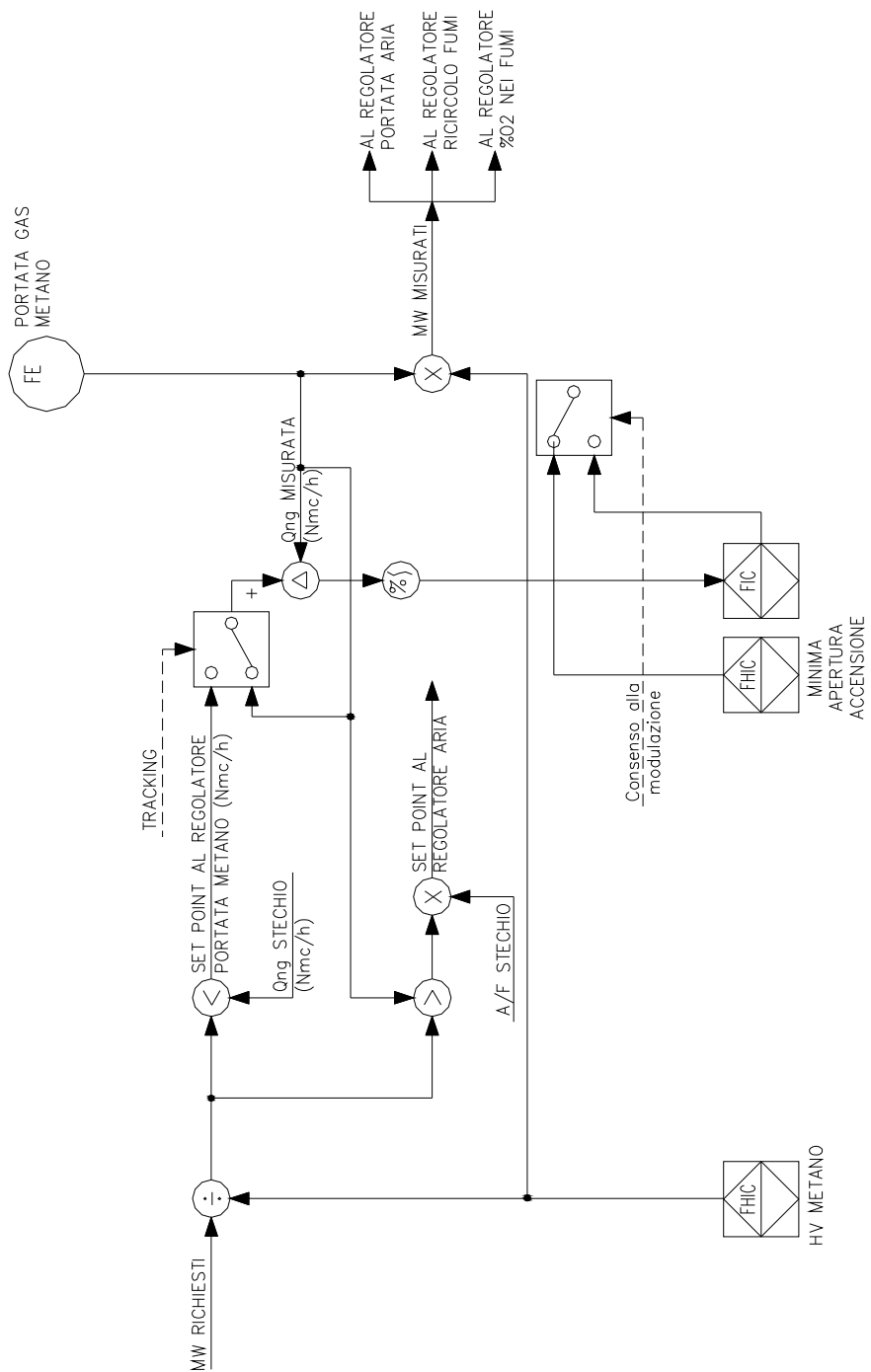


Fig.2.7. Controllo di combustione – Portata metano

2.4.3. Portata aria comburente

La portata di metano letta tramite il trasmettitore FT viene trasformata nella potenza effettivamente prodotta moltiplicandola per il potere calorifico inferiore del metano. Tale potenza misurata risultante viene inviata ad un blocco di interpolazione lineare di una spezzata a 10 punti che stabilisce la relazione tra la potenza misurata e l'eccesso d'aria necessario per la buona combustione. Un esempio della curva dell'eccesso d'aria è riportato nella tabella seguente

N°	% Potenza Misurata (MW)	Eccesso d'aria (%)
1	10%	29.7
2	20%	25
3	30%	20.8
4	40%	17.2
5	50%	14.2
6	60%	11.8
7	70%	9.9
8	80%	8.6
9	90%	7.9
10	100%	7.8

Tab 2.1. Curva eccesso d'aria-potenza misurata

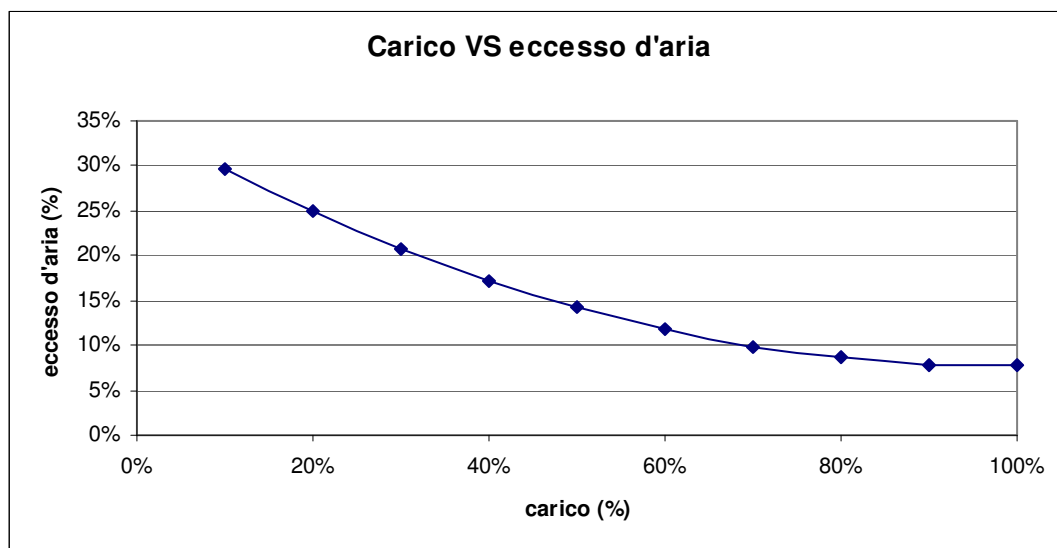


Fig.2.8. Curva eccesso d'aria-potenza misurata

L'eccesso d'aria risultante dalla interpolazione precedente va a sommarsi, opportunamente riscaldato come vedremo in seguito, alla quantità di aria richiesta in base al rapporto stechiometrico con il combustibile al fine di formare il set point finale del regolatore di portata dell'aria di combustione FIC. Al momento attuale la richiesta (set point) di aria di combustione risulta quindi essere data dalla formula:

$$Q_{AIR} = Q_{NG,ACT} \times RS \times \left[1 + \frac{e_{AIR}}{100} \right];$$

dove $Q_{NG,ACT}$ rappresenta l'attuale portata di metano; RS è il rapporto stechiometrico tra aria e metano ed e_{AIR} è l'eccesso d'aria risultante dalla interpolazione della tabella precedente in base all'attuale potenza bruciata.

Tale relazione rappresenta la quantità di aria richiesta, in assenza del contributo dato dal regolatore della correzione dell'ossigeno contenuto nei fumi di scarico. Tale regolatore agisce sul sistema incrementando o diminuendo la quantità di aria richiesta.

La potenza misurata viene anche inviata ad un altro blocco di interpolazione di una spezzata a 10 punti che determina la relazione tra la potenza bruciata e la

percentuale di ossigeno desiderata nei fumi di scarico, al variare del carico del bruciatore. Anche per tale relazione si mostra una tabella tipica.

N°	%Potenza Misurata (MW)	Ossigeno nei fumi (%)
1	10%	4.6
2	20%	4
3	30%	3.5
4	40%	3.1
5	50%	2.7
6	60%	2.3
7	70%	2.1
8	80%	1.9
9	90%	1.8
10	100%	1.75

Tab. 2.2. Curva percentuale di ossigeno nei fumi-potenza misurata

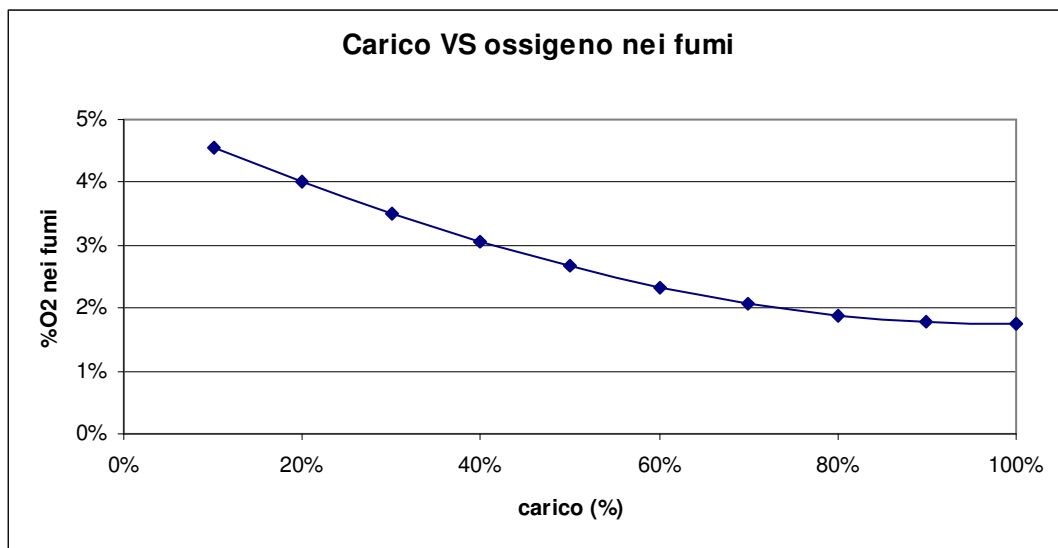


Fig.2.9. Curva percentuale di ossigeno nei fumi-potenza misurata

La presenza di ossigeno nei fumi è letta tramite il trasmettitore AT e inviata come variabile di processo al regolatore AIC; mentre l'uscita dell'interpolazione lineare della tabella dell'ossigeno in base alla potenza misurata, rappresenta il set point del regolatore dell'ossigeno AIC.

L'uscita del controllore AIC compresa nell'intervallo 0% : 100% viene riscalata linearmente in base ad una curva compresa tra 1,3 e 0,7. L'uscita di tale blocco di scalamento lineare viene moltiplicata alla richiesta di portata dell'aria di combustione precedentemente calcolato. La relazione finale che esprime il set point del regolatore dell'aria di combustione risulta quindi:

$$Q_{AIR} = SC_{OXY} \times \left[Q_{NG,ACT} \times RS \times \left[1 + \frac{e_{AIR}}{100} \right] \right]$$

dove SC_{OXY} è l'uscita del regolatore riscalata in base alla relazione lineare suddetta (tra 1.3 e 0.7). Ciò significa che il contributo del controllore dell'ossigeno interviene nel calcolo del set point finale dell'aria di combustione per + o - il 30%. Infatti questo fattore di scala viene moltiplicato per l'eccesso d'aria scaturito dall'interpolazione precedente, al fine di incrementare o diminuire la quantità d'aria richiesta.

Il regolatore della quantità di ossigeno deve essere escludibile con apposito selettore posizionato sul sistema di supervisione ed inoltre deve essere prevista anche una soglia sulla potenza bruciata, al di sotto della quale il regolatore dell'ossigeno viene automaticamente escluso e la sua uscita viene forzata al 50%, che comporta un SC_{OXY} pari a 1.

La portata d'aria di combustione letta attraverso il trasmettitore FT combinata con l'eccesso d'aria risultante dalla tabella fornisce la portata d'aria stechiometrica. Tale valore, diviso per il rapporto stechiometrico aria/combustibile RS, fornisce la portata stechiometrica del combustibile che entra nel blocco passa basso insieme all'attuale portata di metano come visto precedentemente (Fig. 2.7).

La portata d'aria misurata dal trasmettitore FT entra nel regolatore FIC come variabile di processo, mentre la richiesta d'aria calcolata in base alla formula precedente va a determinare il set point del regolatore FIC.

Per il funzionamento della regolazione della portata dell'aria di combustione è previsto uno split range tra l'apertura della serranda FV e la velocità del ventilatore VE. In base alle richieste di apertura/chiusura del regolatore FIC ed in base a soglie di intervento dello split range, vengono generate 2 uscite distinte per comandare in sincrono la serranda FV ed il variatore di frequenza del ventilatore VE.

Il regolatore della portata di aria di combustione e le utenze collegate (serranda e ventilatore) subiscono delle forzature a seconda delle condizioni operative in cui si trova l'impianto. Il regolatore FIC risulta essere in tracking in assenza del segnale proveniente dal BMS "Consenso alla modulazione"; quando è in questa situazione l'uscita del regolatore è forzata al minimo di accensione.

La serranda ed il ventilatore vengono invece forzati ad un determinato valore di apertura e velocità rispettivamente in presenza del segnale proveniente da BMS di "Richiesta lavaggio principale".

Lo schema di regolazione della portata d'aria è rappresentato nelle figure seguenti.

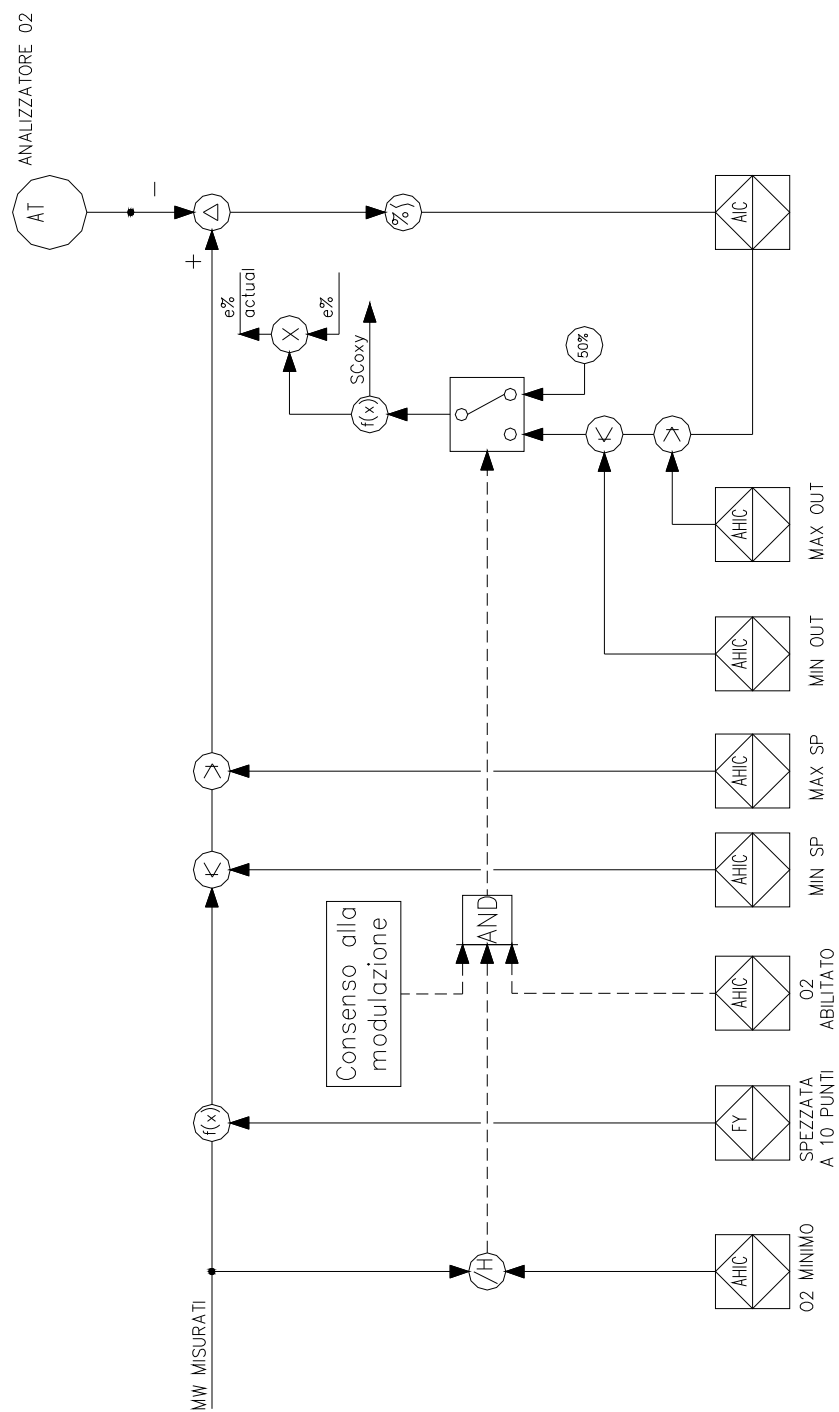


Fig. 2.10. Controllo percentuale di ossigeno nei fumi

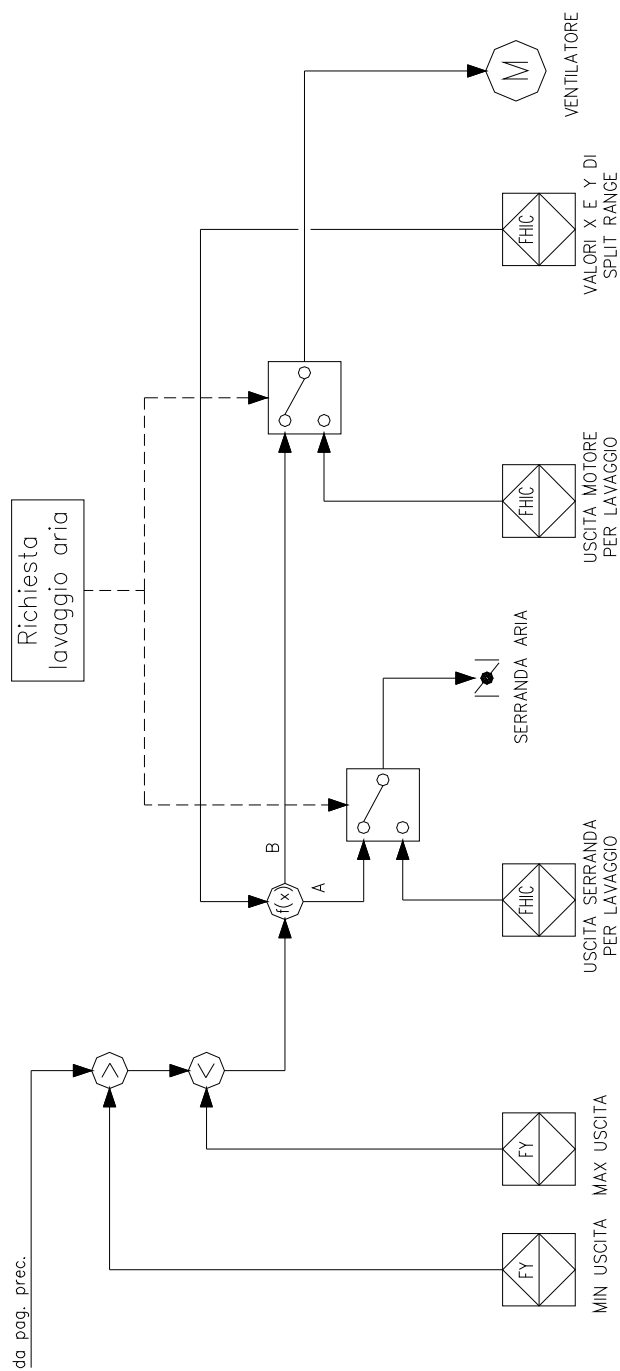


Fig. 2.11.b. Controllo portata aria

2.4.4. Ricircolo fumi

Obiettivo di questa regolazione è quello di regolare la velocità del ventilatore e l'apertura della serranda di ricircolo fumi (in split range) provenienti dalla caldaia. L'utilizzo del ricircolo fumi è indispensabile per l'abbattimento delle emissioni inquinanti NO_x.

La regolazione del ricircolo fumi avviene tuttavia in modo diverso rispetto a quanto visto per la portata di combustibile e di aria comburente in quanto, non essendovi alcun misuratore istantaneo della portata di ricircolo, non si ha un segnale di feedback tramite il quale effettuare la regolazione. Si procede pertanto ad una regolazione di tipo posizionatrice, ossia associando alla potenza termica misurata tramite la lettura della portata di metano (vedi fig. 2.7) una determinata velocità del ventilatore di ricircolo e apertura della serranda in mandata, secondo la curve dello split range impostate nel pannello operatore. Tale regolazione deve tuttavia rispettare il vincolo della percentuale di ossigeno nei fumi, in quanto se tale valore scende al di sotto di una soglia di minimo viene generata una segnalazione di blocco.

Anche per quanto riguarda la regolazione del ricircolo fumi sono presenti alcune forzature in base all'attuale condizione operativa dell'impianto.

Se il segnale proveniente da BMS di "Consenso alla modulazione" è disattivato il regolatore SIC della velocità di rotazione si trova in tracking e la sua uscita è forzata alla minima velocità di accensione; quando i segnali provenienti dal BMS "Richiesta lavaggio ricircolo fumi" e "Richiesta marcia ventilatore ricircolo fumi" sono attivi contemporaneamente, l'uscita del regolatore viene forzata al valore "Uscita per lavaggio", mentre la serranda è forzata all'apertura massima.

Lo schema di regolazione del ricircolo fumi è rappresentato in fig. 2.10.

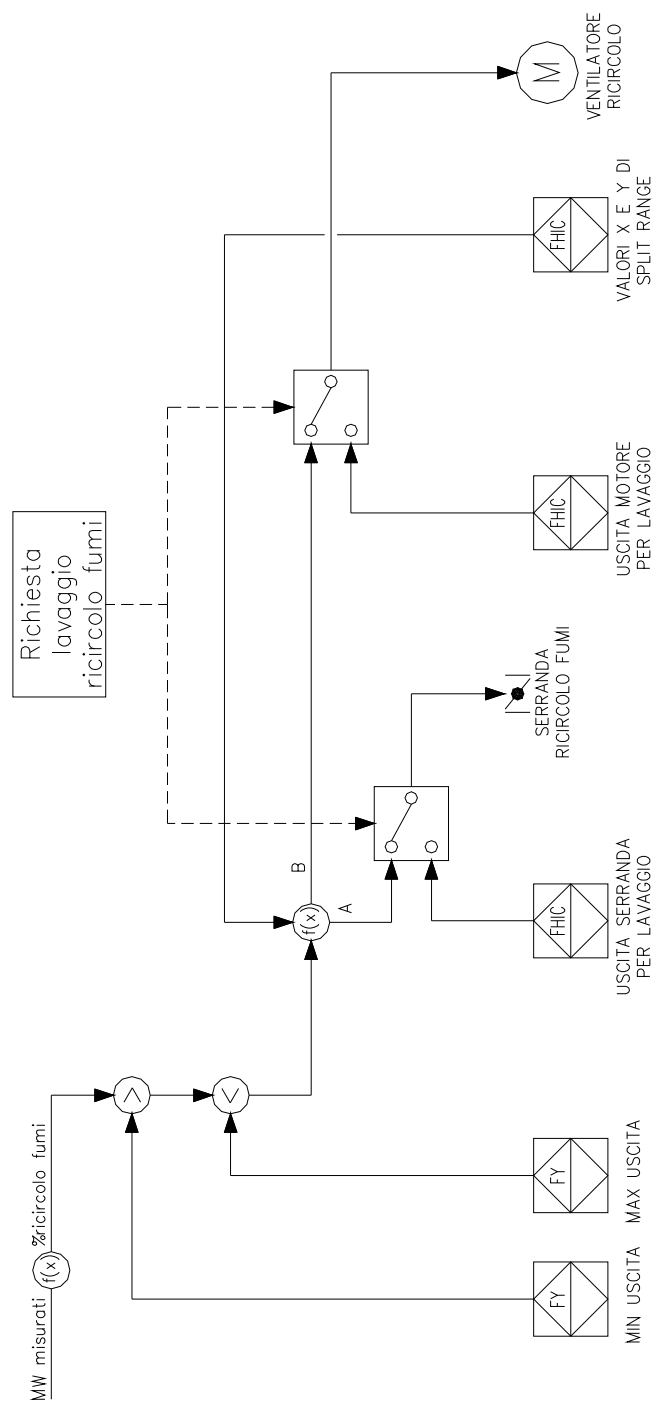


Fig. 2.12. Controllo portata ricircolo fumi

2.4.5. Controllo portata acqua surriscaldata

Obiettivo di questa regolazione è quello di mantenere costante la portata di acqua attraverso la caldaia nelle diverse condizioni operative. Ciò consente di evitare variazioni inaccettabili della temperatura dei componenti, salvaguardando quindi l'integrità del generatore.

La portata letta tramite il trasmettitore FT rappresenta la variabile di processo del regolatore FIC, mentre il set point viene determinato da parte dell'operatore in base alle esigenze operative ed in base alle limitazioni impostate tramite i parametri di set point massimo e minimo.

L'uscita del regolatore FIC va a comandare direttamente il variatore di frequenza della pompa di by-pass alla linea di teleriscaldamento (si veda Fig. 2.3). Nella figura seguente è rappresentato lo schema di regolazione della portata di acqua surriscaldata.

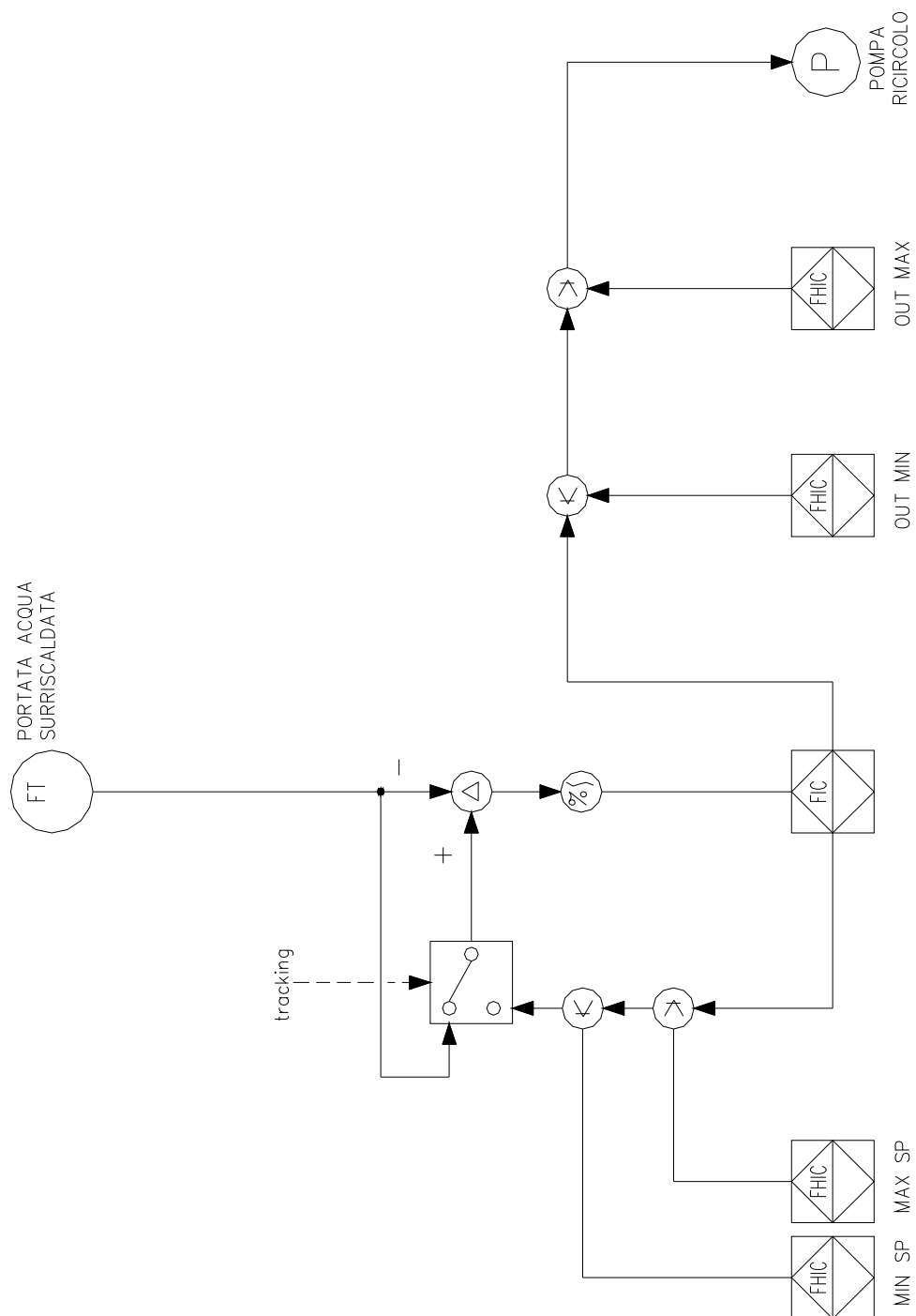


Fig. 2.13. Controllo portata acqua surriscaldata

Capitolo 3

Analisi delle prestazioni del generatore

3.1. Elementi di regolazione di sistemi dinamici

Una macchina è definita come un sistema progettato per svolgere una data funzione e in tale definizione è già implicito il concetto di controllo e regolazione, in quanto l'obiettivo della macchina diventa l'esecuzione, secondo determinati comandi, di certe funzioni in modo da ottenere gli andamenti richiesti delle principali grandezze caratterizzanti il funzionamento della macchina stessa.

Una prima suddivisione tra due diversi tipi di intervento di regolazione o controllo può essere definita fra sistemi di controllo ad anello aperto e sistemi ad anello chiuso.

Nei sistemi di controllo in anello aperto (Fig. 3.1) l'ingresso di riferimento $z_r(t)$, che rappresenta l'obiettivo desiderato, viene passato al controllore che in funzione di esso definisce una forza di controllo $f_c(t)$. Tale forza si combina con un'eventuale azione di disturbo o con altre azioni non direttamente controllate $f_d(t)$ a dare la forza totale che agisce sul sistema. La risposta del sistema alla forza complessiva $f_c(t) + f_d(t)$ è la grandezza $z(t)$ che assume il ruolo di variabile controllata.

La regolazione in anello aperto implica che bisogna conoscere con accuratezza la dinamica del sistema, o attraverso un modello matematico o attraverso misure sperimentale, in modo da definire con precisione l'esatta correlazione fra ingresso ed uscita.

In tale sistema la forza di controllo $f_c(t)$ non dipende dallo stato effettivo del sistema, ma da quello di riferimento imposto come ingresso, pertanto un'eventuale azione di disturbo non controllata $f_d(t)$ o incertezze sul modello fanno sì che lo stato del sistema possa deviare da quello desiderato, senza avere la possibilità di correggere lo stato del sistema.

Per migliorare questo tipo di controllo è possibile modificare l'azione in modo da ridurre l'effetto della variazione di alcuni parametri sull'azione di controllo. Se si riesce ad individuare i disturbi e a misurarli è possibile inserirli nel modello matematico, migliorando preventivamente l'ingresso di riferimento e correggendo in tal modo la risposta del sistema.

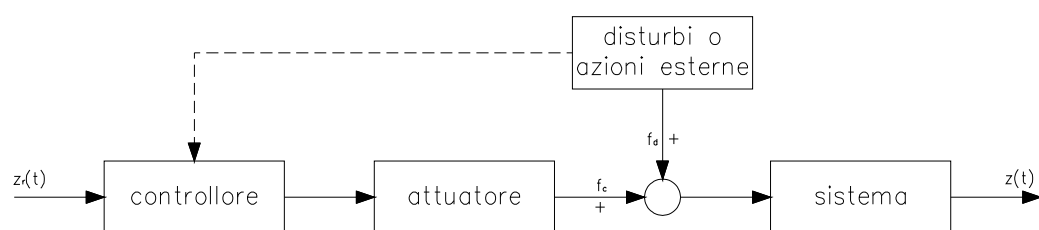


Fig. 3.1. Schema di un sistema di regolazione ad anello aperto

Nei sistemi di controllo in anello chiuso un sensore o trasduttore misura la variabile controllata $z(t)$ ed invia l'informazione al controllore. Quest'ultimo riceve il segnale di riferimento $z_r(t)$ (o lo genera) ed elabora il segnale di errore originando il segnale di controllo da inviare all'attuatore, il quale a sua volta fornisce la forza di controllo $f_c(t)$. Tale sistema prende il nome di controllo retro azionato (*feed-back*).

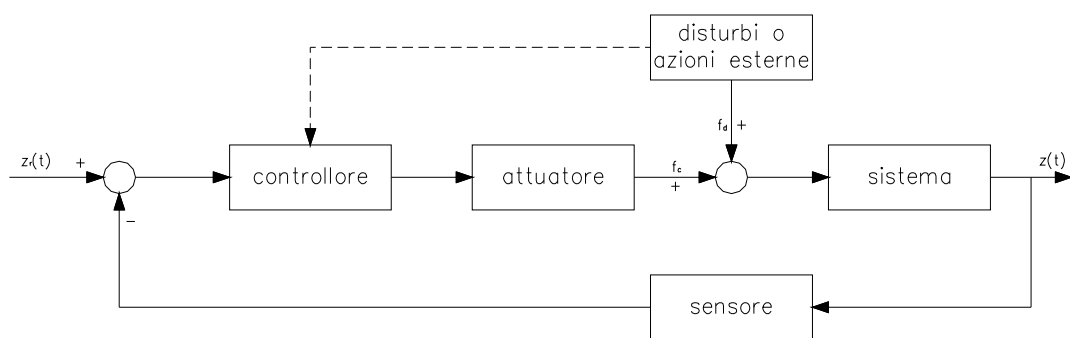


Fig. 3.2. Schema di un sistema di regolazione ad anello chiuso

Le prestazioni di un sistema controllato possono riassumersi in accuratezza, prontezza o velocità di risposta e stabilità; è bene osservare come tali requisiti, in

particolare prontezza ed accuratezza, si presentino spesso in antitesi tra loro ed è pertanto necessario ricercare una soluzione di compromesso.

Industrialmente i regolatori più utilizzati si presentano sotto il nome di PID, vale a dire con un'azione di controllo proporzionale – derivativa - integrale. Il controllore PID genera un'uscita che si presenta come la somma dei tre contributi sopra citati, proporzionali rispettivamente all'errore tra segnale di riferimento e lo stato retro azionato del sistema, alla sua derivata ed al suo integrale nel tempo.

Le tre azioni vengono calcolate separatamente e sommate fra loro algebricamente:

$$u_c(t) = u_p(t) + u_d(t) + u_i(t)$$

L'azione proporzionale è ottenuta moltiplicando l'errore e per un'opportuna costante:

$$u_p(t) = K_p e$$

È possibile regolare un processo con un simile controllore, che risulta anche in grado di stabilizzare processi instabili. Tuttavia non è possibile garantire che l'errore e converga a zero, proprio perché un'azione è possibile solo in presenza dell'errore stesso.

Per ovviare a questo inconveniente si introduce una parte integrativa, la cui azione è proporzionale all'integrale nel tempo del segnale d'errore e :

$$u_i(t) = K_i \int e(t) dt$$

Quest'azione fa sì che il controllore abbia memoria dei valori passati del segnale d'errore; in particolare il valore dell'azione integrale non è necessariamente nulla se è nullo l'errore. Ciò consente di portare il processo esattamente al punto di riferimento richiesto, dove la sola azione proporzionale risulterebbe nulla.

Per migliorare le prestazioni del controllore si può aggiungere l'azione derivativa:

$$u_d(t) = K_d \frac{de}{dt}$$

L'azione derivativa consente di compensare rapidamente le variazioni del segnale d'errore, senza aspettare che quest'ultimo diventi significativo (azione proporzionale) o che persista per un certo tempo (azione integrale).

L'azione derivativa spesso rende troppo sensibile il controllore, in quanto l'azione subirebbe una brusca variazione nel momento in cui il riferimento venisse cambiato istantaneamente. La taratura dell'azione derivativa deve essere pertanto stabilita accuratamente per non sottoporre l'attuatore a sforzi eccessivi.

3.2. Dati di funzionamento del generatore

I generatori ad acqua surriscaldata oggetto della tesi hanno una potenzialità, all'M.C.R., pari a 13.3 MW, con una portata d'acqua elaborata pari a 470 m³/h.

I parametri fondamentali di processo quali la portata di combustibile consumato, la portata d'aria e di ricircolo fumi e le prestazioni al variare del carico sono riportati nella tab. 3.1. Si assumono i seguenti dati:

- temperatura dell'aria pari a 25°C;
- temperatura dell'acqua in uscita dal generatore 120°C;
- umidità pari a 12.9 g/kg;
- calore specifico dell'acqua pari a 4.23 kJ/kgK;
- rendimento del generatore 92%;
- potere calorifico del combustibile 49123 kJ/kg.

La portata di aria comburente è ricavata, nota la portata di combustibile, dal valore dell'eccesso d'aria riportato in tab. 2.1. Tali valori possono essere modificati da parte dell'operatore intervenendo sui dati di set point impostati nel pannello operatore, in modo da raggiungere la condizioni di ottimo tra temperatura dei fumi e formazioni di inquinanti. Allo stesso modo può essere modificata la percentuale di ossigeno nei fumi, che interviene nella regolazione dell'aria tramite il parametro SC_{OXY} con un'influenza pari al 30% (vedi par.2.4.3).

La portata dei fumi di ricircolo è nota e determinata in base all'esperienza derivata dall'esercizio di generatori di costruzione precedente a quella trattata nella tesi. Il ricircolo fumi consente di ridurre la formazione di ossidi di azoto, aumentando la portata massica elaborata dal bruciatore e riducendo in tal modo la temperatura di fiamma, compensando l'effetto del preriscaldatore dell'aria che determinerebbe da solo un aumento delle emissioni.

Carico termico (%)	20%	50%	75%	100%
Potenza termica (MW)	2,7	6,7	10,0	13,3
Delta T (°C)	5	13	19	25
Portata combustibile (kg/h)	212	528	792	1057
Portata aria (kg/h)	4571	10397	14910	19645
Eccesso d'aria (%)	25,0%	14,2%	9,3%	7,8%
Portata ricircolo (kg/h)	360	1411	3069	4137
Percentuale ricircolo (%)	7,5%	12,9%	19,5%	20,0%
Rendimento	89%	91%	92%	91%

Tab. 3.1. Condizioni di funzionamento del generatore al variare del carico

Nei prossimi paragrafi si verificherà come, a partire da una condizione di massimo carico, il sistema di regolazione della combustione (SRC) interviene variando i parametri di processo del generatore al variare del carico richiesto. Per maggiore chiarezza si vedano i loop di processo schematizzati nel capitolo 2.

3.3. Diminuzione di carico: 100% → 75%

Si ipotizza un funzionamento iniziale del generatore in condizioni stazionarie al 100% del carico. A seguito di una diminuzione della richiesta termica dalla rete, per mantenere costante la temperatura dell'acqua in uscita dal generatore, il sensore di temperatura posto sulla linea di uscita invia un segnale all'algoritmo PID, confrontandolo col segnale generato dal regolatore TIC che forma il set point della

temperatura dell'acqua. Il TIC agisce con una regolazione inversa, ossia ad una diminuzione della variabile di processo corrisponde un aumento dell'uscita del regolatore, e viceversa. In questo caso la diminuzione del carico termico richiesto dalla rete comporta un aumento della temperatura di ritorno dell'acqua in caldaia, con un conseguente aumento della temperatura in uscita.

Il regolatore interviene pertanto diminuendo il segnale in uscita, limitando la rapidità di variazione del carico al valore:

$$\Delta_{carico} = \frac{0.8 \cdot 13.3 \text{ MW}}{60 \text{ s}} = 0.177 \frac{\text{MW}}{\text{s}}$$

La nuova richiesta termica, al 75% del carico, è pari a 10 MW, trasformata nella corrispondente portata di combustibile:

$$Q_{NG \text{ rich}} = \frac{MW_{rich} \cdot 10^3 \cdot 3600}{PCI} = 733 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Tale portata viene confrontata nel filtro passa-basso con la portata $Q_{NG \text{ stecho}}$ proveniente dal loop di regolazione dell'aria e determinata come segue.

La portata di aria misurata viene divisa per l'eccesso d'aria $e\%_{actual}$ a sua volta proveniente dal loop di regolazione dell'ossigeno.

I MW misurati vengono calcolati nel seguente modo:

$$MW_{mis} = \frac{PCI \cdot Q_{NG \text{ mis}}}{3600 \cdot 10^3} = 14.4 \text{ MW}$$

Il blocco di interpolazione nel loop dell'ossigeno legge questo valore e restituisce la percentuale di ossigeno nei fumi richiesta, pari all'1.75% secondo quanto imposto dal minimo set point dell'ossigeno nei fumi. L'uscita dell'AIC viene riscalata nell'intervallo 0.7÷1.3 a formare il parametro SC_{OXY} , in tal caso pari a 1 essendo la percentuale di ossigeno nei fumi misurata esattamente pari a 1.75%.

Il regolatore AIC, a differenza del TIC, è un regolatore ad azione diretta, in quanto un aumento della concentrazione misurata di ossigeno nei fumi comporta un aumento dell'uscita. Il blocco di interpolazione invece interviene in senso contrario, secondo quanto rappresentato in fig. 3.1. Se la concentrazione di ossigeno nei fumi

misurata è maggiore di quella richiesta, il parametro SC_{OXY} sarà minore di 1 e la regolazione dell'aria sarà in difetto, viceversa il parametro sarà maggiore di 1 e l'eccesso d'aria aumenterà. L'eccesso d'aria $e\%_{actual}$ rappresenta pertanto l'eccesso d'aria corretto rispetto alla percentuale di ossigeno nei fumi desiderata.

Inizialmente, poiché le condizioni sono stazionarie, si avrà pertanto:

$$e\% = e\%_{actual} = 7.8\% ;$$

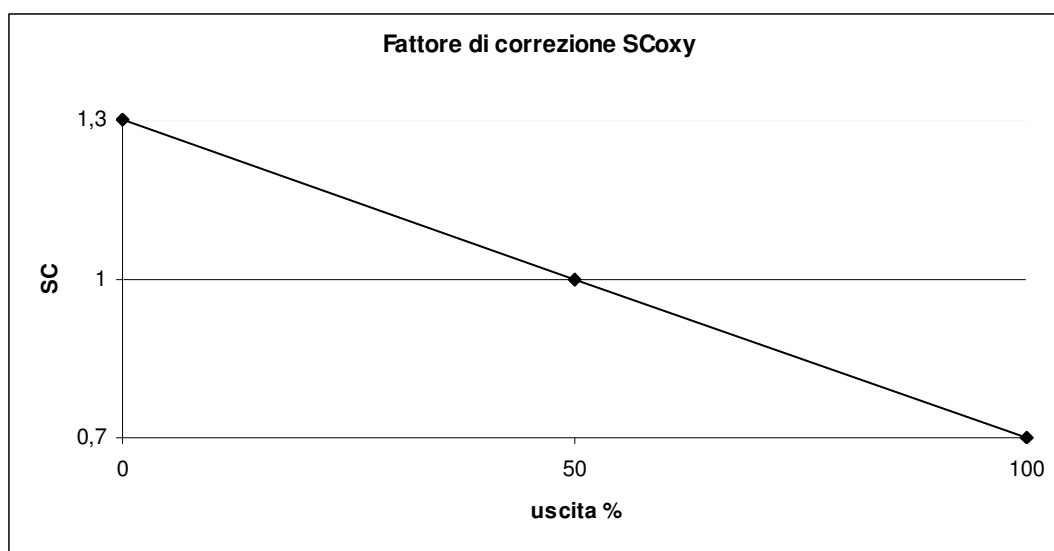


Fig. 3.3. Effetto del fattore di correzione SC_{OXY}

La portata d'aria misurata viene finalmente elaborata nella portata di gas metano stechiometrica nel seguente modo:

$$Q_{AIRstecchio} = \frac{Q_{AIRmis}}{\left(1 + \frac{e\%_{actual}}{100}\right)} = \frac{19645}{\left(1 + \frac{7.8\%}{100}\right)} = 18223 \frac{kg}{h}$$

$$Q_{NGstecchio} = \frac{Q_{AIRstecchio}}{\lambda} = 1057 \frac{kg}{h}$$

Il filtro passa-basso confronta quest'ultimo valore con la portata di gas metano richiesta a carico ridotto, lasciando passare come set point il minore dei valori entranti, ossia la portata di gas naturale richiesta.

Per quanto riguarda la regolazione dell'aria, la portata di gas naturale richiesta Q_{NGrich} viene confrontata nel filtro passa-alto con il valore misurato dal dispositivo di misurazione del combustibile:

$$Q_{NGmis} = 1057 \frac{kg}{h}$$

Quest'ultimo diventa pertanto il set point per il regolatore dell'aria, opportunamente moltiplicato per il rapporto stechiometrico:

$$Q_{AIRstechio} = Q_{NGmis} \cdot \lambda = 18223 \frac{kg}{h};$$

valore che dev'essere riscaldato per l'eccesso d'aria $e\%_{actual}$:

$$Q_{AIR SP} = Q_{AIRstech} \cdot \left(1 + \frac{e\%_{actual}}{100} \right) = 19645 \frac{kg}{h}$$

Ciò significa che, inizialmente, la portata d'aria di set point e misurata sono le medesime, mentre il set point al regolatore di combustibile è inferiore rispetto al valore misurato. Mentre il filtro passa-basso consente alla portata di combustibile di diminuire seguendo la richiesta di carico, la portata d'aria è vincolata dal filtro passa-alto alla portata di gas combustibile misurata e le è di fatto impedito di diminuire finchè la portata di combustibile non è stata ridotta.

L'effetto ottenuto è quello di ritardare la diminuzione dell'aria comburente rispetto alla diminuzione della portata di combustibile, con un conseguente beneficio dal punto di vista della formazione di ossidi di azoto dal momento che si mantiene costantemente una miscela magra, contenendo pertanto la temperatura di fiamma e mantenendo elevata la concentrazione di ossigeno nei fumi.

Poiché la regolazione avviene gradualmente secondo quanto imposto dal limitatore di velocità, le portate di metano ed aria comburente vengono ridotte strozzando la valvola pneumatica del gas naturale e intervenendo sulla serranda dell'aria ed il variatore di frequenza del ventilatore, secondo quanto imposto dalla curva di split range. Una curva d'esempio è riportata in figura 3.4.

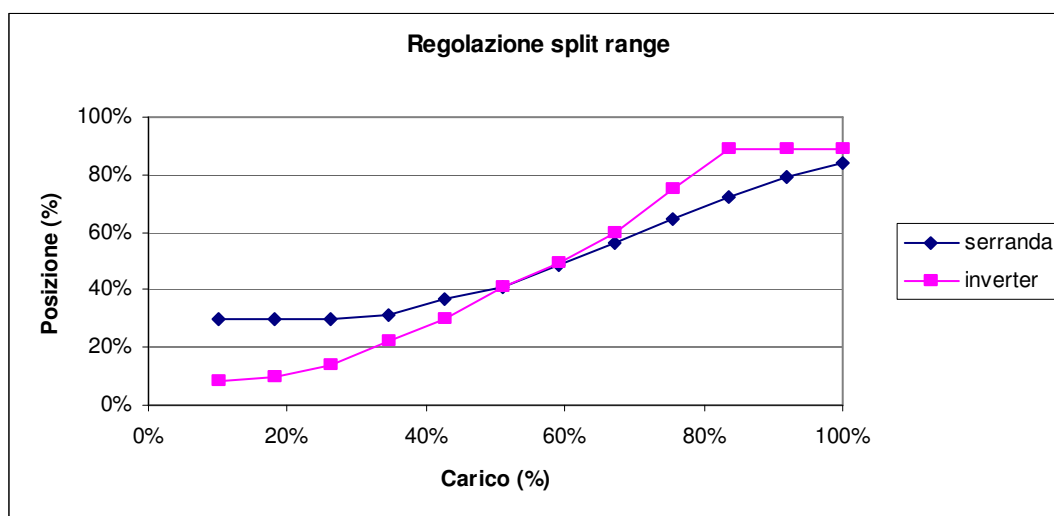


Fig. 3.4. Curve di regolazione della portata d'aria

Essendo la portata d'aria proporzionale al quadrato della velocità di rotazione del ventilatore, si preferisce effettuare la regolazione nella prima parte della curva per mezzo del solo variatore di frequenza, mantenendo fissa la posizione della serranda. Poiché al di sotto del 50% della velocità di rotazione l'effetto di regolazione dell'inverter diventa trascurabile, interviene la serranda di regolazione strozzando l'apertura e, di conseguenza, modificando il punto di funzionamento lungo la curva del ventilatore a velocità pressoché costante. L'abbinamento di questi due fattori consente di ottenere un ottimo grado di regolazione della portata in un ampio intervallo.

3.4. Aumento di carico: 75% → 100%

Partendo da una condizione di funzionamento stazionario al 75% del carico, un aumento della richiesta termica dalla rete si traduce in una diminuzione delle temperatura dell'acqua di ritorno alla caldaia e, conseguentemente, della temperatura di mandata del generatore.

Il sensore TE posto sulla linea in uscita dal generatore invia un segnale all'algoritmo PID, confrontandolo con il set point inviato dal regolatore TIC.

L'uscita del regolatore determinerà un aumento del carico termico richiesto in MW; tale valore viene diviso per il potere calorifico del combustibile per fornire la portata di combustibile richiesta, pari a:

$$Q_{NG\ rich} = \frac{MW_{rich} \cdot 10^3 \cdot 3600}{PCI} = 975 \frac{kg}{h}$$

Tale valore viene confrontato nel filtro passa - basso con la portata determinata dal loop di regolazione dell'aria comburente.

La portata di combustibile misurata determina i MW misurati, valore che attraverso il blocco di interpolazione determina l'eccesso d'aria richiesto.

$$MW_{mis} = \frac{PCI \cdot Q_{NGmis}}{3600 \cdot 10^3} = 10.8 MW$$

In queste condizioni l'eccesso d'aria uscente dal blocco di interpolazione è pari circa all'8.5%, valore corretto dal parametro SC_{OXY} in funzione della percentuale di ossigeno misurata nei fumi. Si ha pertanto:

$$Q_{AIRstechio} = \frac{Q_{AIRmis}}{\left(1 + \frac{e\%_{actual}}{100}\right)} = \frac{14910}{\left(1 + \frac{8.5\%}{100}\right)} = 13742 \frac{kg}{h}$$

$$Q_{NGstechio} = \frac{Q_{AIRstechio}}{\lambda} = 797 \frac{kg}{h}$$

Il filtro passa-basso mantiene pertanto inalterata la portata di combustibile, di fatto impedita dalla portata d'aria misurata che, finchè non viene incrementata, non consente al sistema di regolazione di aumentare la portata di combustibile verso il bruciatore.

L'eccesso d'aria, riscaldato tramite il parametro SC_{OXY} , moltiplica la portata $Q_{AIRstechio}$ proveniente dal loop di regolazione della portata metano. Quest'ultima è determinata dal filtro passa-alto che confronta la portata di combustibile richiesta e la portata misurata. In questo caso si ha:

$$Q_{NGmis} = 792 \frac{kg}{h} \quad ; \quad Q_{NGrich} = 975 \frac{kg}{h}$$

La portata di combustibile richiesta determina pertanto il set point per la portata d'aria comburente, opportunamente riscalata per il rapporto stechiometrico e l'eccesso d'aria richiesto:

$$Q_{AIRstchio} = Q_{NGmis} \cdot \lambda = 16809 \frac{kg}{h}$$

$$Q_{AIR SP} = Q_{AIRstch} \cdot \left(1 + \frac{e\%_{actual}}{100} \right) = 18238 \frac{kg}{h}$$

Essendo la portata d'aria misurata pari a circa 14000 kg/h, il regolatore FIC della portata d'aria interviene aumentando il segnale in uscita e, tramite la curva di split range, aumenta la velocità di rotazione del ventilatore e l'apertura della serranda finchè la portata misurata non corrisponde a quella richiesta.

La portata di combustibile aumenta di conseguenza fino al valore richiesto, mantenendo una combustione con forte eccesso d'aria e limitando, durante il transitorio, la formazione di ossidi di azoto.

Conclusioni

Durante il periodo di stage svolto presso la società Bono Energia SpA si è avuta la possibilità di analizzare nel dettaglio i principi di funzionamento fondamentali di generatori di vapore e ad acqua surriscaldata di varia taglia per utilizzo prevalentemente industriale. Scopo del lavoro era di rappresentare materialmente le conoscenze acquisite applicandole su un prodotto esistente e avente caratteristiche tali da sintetizzare le conoscenze acquisite.

I generatori ad acqua surriscaldata destinati all'integrazione presso il Polo Ambientale Integrato di Parma possiedono le caratteristiche sopracitate. In particolare si è dimostrato come una regolazione di tipo misuratrice, quale quella applicata al generatore oggetto del lavoro, consente intrinsecamente di mantenere in sicurezza il funzionamento della caldaia stessa.

La strumentazione montata a bordo, in conformità alla normativa UNI/TS 11325-3, consente di gestire il funzionamento del generatore con esenzione della presenza dell'operatore, il cui unico compito consiste nell'avviare la sequenza di accensione del generatore (autogestita dal sistema BMS) e nello svolgere, allo scadere del periodo di esenzione (24h) i test di verifica del corretto funzionamento dei dispositivi di controllo.

Il feedback dei parametri di regolazione misurati in tempo reale consente di portare rapidamente il funzionamento del generatore al carico richiesto, consentendo di mantenere in ogni istante il rapporto aria/combustibile in condizioni tali da mantenere la formazione di inquinanti al di sotto dei valori richiesti. Se le variabili di processo superano i limiti (minimo e massimo) imposti tramite il pannello di controllo, l'intervento dei sistemi di blocco interrompe il funzionamento del generatore e l'operatore viene richiamato per verificare le cause del blocco e riavviare la sequenza di accensione.

Conclusioni

In definitiva il generatore si adatta all'inserimento in un impianto complesso, con gestione di tipo DCS nella quale i vari componenti del processo sono gestiti localmente e connessi ad un sistema centrale di monitoraggio e controllo delle principali grandezze di lavoro, mantenendo in ogni istante le condizioni ottimali del processo.

Appendice 1

UNI/TS 11325-3: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata

A titolo informativo, si fornisce un estratto della specifica tecnica di riferimento per la sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata.

In particolare si focalizzerà l'attenzione sulle disposizioni relative alla sorveglianza senza presenza continua per un periodo di 24h.

1. Scopo e campo d'applicazione

La presente specifica tecnica definisce le modalità di sorveglianza delle attrezzature a pressione, a focolare con rischio di surriscaldamento, destinate alla generazione di vapore d'acqua e/o acqua surriscaldata a temperatura maggiore di 110°C con pressione massima ammissibile (PS) maggiore di 0.5 bar

2. Termini e definizioni

Blocco: Interruzione dell'alimentazione della fonte di energia termica che richiede un intervento manuale per il ripristino.

Dispositivo autocontrollato: Dispositivo permanentemente in grado di mettersi in sicurezza nel caso di propria avaria senza l'ausilio di dispositivi esterni, con l'aiuto della sola sorgente di energia che assicura il suo normale funzionamento.

Generatore a funzionamento automatico: Generatore il cui funzionamento è controllato da apparecchiature automatiche che regolano il sistema di produzione

del calore e l'alimentazione dell'acqua in funzione di determinate grandezze di riferimento ed è protetto da sistemi di sicurezza pure automatici.

Riaccensione del generatore: Operazione di avviamento del generatore dopo l'intervento di un dispositivo di blocco. L'avviamento è possibile solo manualmente dopo che sono state eliminate le cause che hanno determinato l'azione di blocco.

Sorveglianza: Per i generatori a funzionamento automatico è il controllo, da parte della persona addetta, per accertarsi che il generatore e tutti i suoi dispositivi siano nelle normali condizioni di funzionamento. Per i generatori a funzionamento non automatico è la conduzione del generatore, da parte della persona addetta, e il controllo per accertarsi che esso e tutti i suoi dispositivi siano nelle normali condizioni di funzionamento. La sorveglianza può essere con assistenza continua o senza assistenza continua.

Sorveglianza con assistenza continua: Sorveglianza con la presenza continua, in centrale termica o in sala controllo di persona addetta durante il funzionamento del generatore fino alla sua messa in sicurezza.

Sorveglianza senza assistenza continua: Sorveglianza con la presenza saltuaria in centrale termica o in sala controllo di persona addetta durante il funzionamento del generatore

3. Sorveglianza senza assistenza continua

La sorveglianza senza assistenza continua richiede, nella centrale termica, la presenza di persona addetta:

- In fase di accensione e riaccensione del generatore;

- Durante i sopralluoghi periodici per la verifica del funzionamento dei dispositivi di controllo, regolazione e sicurezza.

Durante il funzionamento, la persona addetta deve accertare le buone condizioni dell'impianto della caldaia. Questo deve essere fatto entro un'ora da ogni accensione e riaccensione e almeno una volta entro ogni prevista periodicità di sorveglianza senza assistenza continua (ogni 24h oppure ogni 72h).

In caso di guasto dei dispositivi di regolazione e controllo, il generatore può essere gestito in condizioni di sicurezza con sorveglianza continua manuale se il funzionamento con tale tipo di sorveglianza è conforme a una procedura d'emergenza scritta e chiaramente definita nel manuale d'uso. La sorveglianza continua manuale deve essere prevista fino a che il guasto non è stato riparato ed è trascorso un adeguato periodo di tempo per garantire, attraverso un controllo del dispositivo riparato, che il generatore e i suoi dispositivi funzionino correttamente.

4. Sorveglianza senza assistenza continua fino a 24h

Durante l'esercizio del generatore, entro le 24h devono essere effettuati i seguenti controlli:

- Controllo dell'efficienza dei livellostati di sicurezza. I livellostati di sicurezza di tipo auto controllato devono essere controllati secondo le seguenti modalità:

1. o provocando le reali condizioni di intervento;
2. o per simulazione elettrica.

Per i generatori d'acqua surriscaldata, nel caso in cui non sia possibile provocare le reali condizioni di intervento, è accettabile il controllo per simulazione elettrica.

- Controllo del pH e della durezza totale dell'acqua di alimentazione;
- Controllo del pH, dell'alcalinità, della durezza totale e della conducibilità elettrica e/o salinità dell'acqua in caldaia;

Appendice 1

- Spurgo degli indicatori di livello regolamentari, dei barilotti intermedi e/o dei contenitori.

Devono essere inoltre effettuati almeno una volta a settimana i seguenti controlli e prove:

- Verifica dell'efficienza del pressostato di blocco. Il controllo può essere effettuato provocando le reali condizioni di intervento o per simulazione elettrica;
- Verifica dell'efficienza del termostato di blocco. Il controllo può essere effettuato provocando le reali condizioni di intervento o per simulazione elettrica.

Nel caso in cui i controlli e le prove non vengano effettuati entro le periodicità prescritte deve essere prevista la presenza immediata in centrale termica della persona addetta che deve gestire il generatore con sorveglianza continua fino a quando non ha effettuato, con esito positivo, i controlli e le prove richieste.

Nel caso in cui il generatore è andato in blocco per l'intervento di un eventuale dispositivo o sistema che rileva la mancata esecuzione entro la periodicità delle prove richieste, prima della riaccensione la persona addetta deve effettuare i controlli e le prove previste.

Elenco degli acronimi

AE	Analysis Element
AIC	Analysis Indicating Controller
BMS	Burner Management System
BV	Burner Valve
BZ	Burner Final Element
DCS	Distributed Control System
FE	Flow Primary Element
FIC	Flow Indicating Controller
FSSL	Flow Switch Low-Low
FT	Flow Transmitter
FV	Flow Valve
LSSL	Level Switch Low-Low
MCC	Motor Control Center
MCR	Maximum Continuous Rating
PAI	Polo Ambientale Integrato
PID	Proportional Integrative Derivative controller
PCV	Pressure Control Valve
PDSLL	Pressure Differential Switch Low-Low
PLC	Programmable Logic Controller
PSHH	Pressure Switch High-High
PSLL	Pressure Switch Low-Low
PSV	Pressure Safety Valve
PT	Pressure Transmitter
SIC	Speed Indicating Controller
SRC	Sistema di Regolazione della Combustione
TE	Temperature primary Element

Elenco degli acronimi

TIC	Temperature Indicating Controller
TSH	Temperature Switch High
TSHH	Temperature Switch High-High
ZSH	Position Switch High
ZSL	Position Switch Low
ZT	Position Transmitter